

Toomas Innos

**BETONITÄYTTEISEN TERÄSPUTKIPRO-
FIILILIITTOPILARIN RAKENTEELLINEN
TOIMINTA PALOSSA JA KESTÄVYYK-
SIEN VERTAILU HIILI- JA RUOSTUMAT-
TOMALLA TERÄSPROFIILILLA**

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Elokuu 2019

TIIVISTELMÄ

TOOMAS INNOS: Betonitäytteisen teräsputkiprofiili-liittopilarin rakenteellinen toiminta palossa ja kestävyyksien vertailu hiili- ja ruostumattomalla teräsprofiililla
Tampereen yliopisto

Diplomityö, 87 sivua, 140 liitesivua

Elokuu 2019

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: Prof. Anssi Laaksonen ja Prof. Mikko Malaska

Avainsanat: Liittopilari, hiiliteräs, RST, Ruostumaton teräs, palomitoitus

Tässä diplomityössä tutkitaan monikerrosliittopilarin rakenteellista toimintaa palotilanteessa. Liittopilarin taivutusjäykkyys pienenee palotilanteessa. Pilarin statikka muuttuu ja taivutusmomentti jakautuu monikerros pilarin kerrosväleille eri tavalla kuin normaalilämpötilassa. Taivutusmomentin jakautumista tutkitaan tilanteissa, joista rasitus syntyy epäkeskeisestä puristuskormituksesta tai tasaisesta tuulikuormasta. Laskenta suoritetaan mekaniikan siirtymämenetelmällä. Lisäksi selvitetään, kuinka paljon liittopilarien puristus- ja taivutusjäykkyydet pienentyvät palotilanteessa. Tästä tehdään esimerkkilaskelmat muutamalla tavanomaisella profiililla eri palonkestoajoilla. Monikerrosliittopilarin nurjahduspituuksia tutkitaan laskennallisesti, kun liittopilarin taivutusjäykkyys on pienentynyt ja saatuja tuloksia verrataan Eurokoodin SFS-EN 1994-1-2 esittämiin lukuarvoihin. Laskenta suoritetaan stabiilisuusteorian momenttimenetelmällä ja tuloksien oikeellisuus varmistetaan kahdella elementtimenetelmään perustuvalla tietokoneohjelmistolla.

Liittopilarien kestävyys lasketaan standardin SFS-ENV 1994-1-1 esittämällä yksinkertaisella laskentamenetelmällä. Menetelmällä saatuja puristuskormin ja taivutusmomentin sekä vinon taivutuksen yhteisvaikutuskuvaajia analysoidaan ja niitä vertaillaan erilaisilla liittopilaripoikkileikkauksilla normaalilämpötilassa ja palotilanteessa. Poikkileikkauksen lämpötilajakauma lasketaan elementtimenetelmään perustuvalla tietokoneohjelmistolla. Lisäksi analysoidaan rakenneteräsprofiilin ulkopinnan emissiivisyyttä hiiliteräksellä ja ruostumattomilla teräslajeilla. Eurokoodin SFS-EN 1994-1-2 määrittelemää emissiivisyyden mitoitusarvoa verrataan todellisiin, tutkimustuloksiin perustuviin lukuarvoihin.

Lopuksi liittopilarin suurimpia normaalivoimakestävyyksiä selvitetään muutamille tavanomaisille poikkileikkauksille varioimalla teräsprofiilin teräslaatuja hiili-, austeniittisen-, ferriittisen- ja austeniittis-ferriittisen teräksen välillä. Lisäksi varioidaan teräsprofiilin seinämävahvuutta sekä betoniraudoitusta. Laskenta suoritetaan muutamilla tavanomaisilla pilarin korkeuksilla ja puristuskormin epäkeskisyyksillä. Laskennassa käytetään edellä tutkittuja ja pohdittuja nurjahduspituuksia sekä otetaan huomioon taivutusmomenttien uudelleen jakaantuminen palotilanteessa.

Tämän tutkimuksen perusteella tietyt ruostumattomat teräslajit ovat käyttökelpoisia ja kilpailukykyisiä vaihtoehtoja liittopilarin teräsprofiiliksi. Erityisesti austeniittinen ruostumaton teräslaji EN 1.4301 on erinomainen vaihtoehto paloluokassa R120 ja sitä suuremmissa paloluokissa, jolloin sen kestävyys on selvästi suurempi kuin vastaavalla hiiliteräksestä valmistetulla liittopilarilla.

ABSTRACT

TOOMAS INNOS: Structural behavior of a concrete-filled steel tube column in fire and comparison of load capacity with a carbon and stainless-steel sections

Tampere University

Master of Science Thesis, 87 pages, 140 Appendix pages

August 2019

Master's Degree Program in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiner: Prof. Anssi Laaksonen and Prof. Mikko Malaska

Keywords: Composite column, Carbon steel, Stainless-steel, Fire Design

This thesis discusses the structural behavior of multistory composite column in fire situation. In fire situation, the distribution of bending moment is contemplated when bending stiffness is reduced in situation where bending moment is formed from ununiformly loaded joint in top of column or uniform wind load. The calculations are performed by slope-deflection method. In addition, the reduction of axial and bending stiffness of composite column in fire situation is evaluated. Example calculations are conducted for reductions of axial and bending stiffness in certain fire classes. The lateral buckling lengths or the multistory column are calculated computationally when the bending stiffness of the composite column is reduced in fire situation and the results obtained are compared to the values indicated by the Eurocode SFS-EN 1994-1-2. The calculation is performed by slope-deflection method but in accordance of stability theory and also with computer software based on finite element method to verify results.

The load bearing capacities of composite columns are calculated using the simple calculation method presented in standard SFS-ENV 1994-1-1. The interaction curves of compression and bending moment and bilateral bending moment obtained by the simple calculation method are discussed and compared with various cross sections of composite column in normal temperature and in fire situation. The temperature distribution of the composite cross section is calculated with computer based finite element method software. Furthermore, an analysis of the emissivity is conducted for outer surface of the structural steel profile in carbon and stainless-steel grades. The design value of emissivity defined in Eurocode SFS-EN 1994-1-2 is compared with actual numerical values based on research results.

Finally, the maximum axial force capacity of the composite columns is determined for a few conventional cross sections by varying the steel grade of the structural steel profile between carbon, austenitic, ferritic and austenitic-ferritic steel. In addition, the thickness of profile and reinforcements are varied. The calculation is performed for three widely used column heights and eccentricities for the axial load. The lateral buckling lengths used in calculation and the bending moments in fire situation are reduced in accordance to discussion earlier in this thesis.

Based on this study, certain grades of stainless-steel are viable and competitive alternatives for steel profile in composite column. In particular, the austenitic stainless-steel grade EN 1.4301 is an excellent alternative in the fire class R120 and longer fire situations, where composite columns load bearing capacity is significantly higher than that of the corresponding carbon steel composite column.

ALKUSANAT

Haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni hienovaraisesta ja yleensä vähemmän hienovaraisesta kärsivällisyydestä tätä tutkimustyötä kohtaan. Lisäksi haluan kiittää kollegoitani A-Insinöörit Oy:ssä neuvoista ja ehdotuksista sekä erityisesti DI Ville Lainetta, TkK Matias Hirvikoskea, DI Jani Humalajokea ja DI Timo Leppästä avuliaista käsistään tämän lopputyön teknisten haasteiden ratkaisemisen myötä.

Haluan kiittää myös rakasta avovaimoani Eveä kestämisestä.

Tampereella 17.8.2019

Toomas Innos

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | JOHDANTO | 1 |
| 2. | LIITTOPILARIN RAKENTEELLINEN TOIMINTA..... | 3 |
| 2.1 | Pilarin toiminta palotilanteessa | 3 |
| 2.2 | Liittopilarin jäykkyys palotilanteessa | 9 |
| 2.3 | Nurjahduspituus | 17 |
| 3. | SUUNNITTELUPERUSTEET..... | 24 |
| 3.1 | Materiaalit | 24 |
| 3.2 | Mekaaniset materiaaliominaisuudet..... | 25 |
| 3.3 | Termiset materiaaliominaisuudet | 32 |
| 4. | POIKKILEIKKAUKSEN PURISTUS- JA TAIVUTUSKESTÄVYYDET | 38 |
| 4.1 | Puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutus..... | 38 |
| 4.2 | Vino taivutus | 48 |
| 5. | MITOITUS..... | 56 |
| 5.1 | Palotilan lämpötila..... | 57 |
| 5.2 | Liittopilaripoikkileikkauksen lämpötila | 58 |
| 6. | KESTÄVYYKSIEN VERTAILU ERI TERÄSLAJEILLA..... | 64 |
| 7. | YHTEENVETO | 83 |
| | LÄHTEET..... | 84 |
| | LIITTEET | 87 |

LYHENTEET JA MERKINNÄT

| | |
|--------------------|---|
| <i>EC</i> | Eurokoodi (Eurocode) |
| <i>STAB</i> | stabiilisuusteoria |
| <i>ANSYS</i> | elementtimenetelmään perustuva tietokoneohjelmisto |
| <i>RFEM</i> | elementtimenetelmään perustuva tietokoneohjelmisto, joka on suunnattu rakennesuunnitteluun |
| A_i | poikkileikkauksen osan i poikkipinta-ala |
| $A_{i,\theta}$ | poikkileikkausalkion i lämpötilaa θ vastaava pinta-ala |
| A_{sn} | yksittäisen raudoitustangon pinta-ala |
| b | Poikkileikkauksen leveys |
| c | raudoituksen betonipeite |
| c_i | materiaalin i ominaislämpökapasiteetti |
| e | epäkeskeisyys |
| E_{cm} | betonin sekanttikimmomoduuli |
| $E_{c,eff}$ | betonin pitkäaikaisvaikutukset huomioiva kimmokerroin |
| $E_{c,sec,\theta}$ | betonin lämpötilaa θ vastaava sekanttikimmokerroin |
| E_i | poikkileikkauksen osan i kimmomoduuli |
| $E_{i,fi}$ | poikkileikkauksen osan i kimmomoduuli palotilanteessa |
| EA | liittopilarin aksiaalijäykkyys |
| EA_{eff} | liittopilarin aksiaalijäykkyys normaalilämpötilassa |
| EA_{fi} | liittopilarin aksiaalijäykkyys palotilanteessa |
| EA_i | poikkileikkauksen osan i aksiaalijäykkyys |
| $EA_{i,fi}$ | poikkileikkauksen osan i aksiaalijäykkyys palotilanteessa |
| EI | liittopilarin taivutusjäykkyys |
| EI_{eff} | liittopilarin suhteellisen hoikkeuteen laskentaan käytettävä tehollinen taivutusjäykkyys |
| $EI_{eff,II}$ | liittopilarin tehollinen taivutusjäykkyys |
| EI_{fi} | liittopilarin taivutusjäykkyys palotilanteessa |
| EI_i | poikkileikkauksen osan i taivutusjäykkyys |
| $EI_{i,fi}$ | poikkileikkauksen osan i taivutusjäykkyys palotilanteessa |
| EI_{ij} | kerrospilarin välillä ij taivutusjäykkyys |
| f_i | osan i karakteristinen puristuslujuus |
| f_{id} | osan i puristuslujuuden mitoitusarvo |
| I_i | poikkileikkauksen osan i neliömomentti |
| h | poikkileikkauksen korkeus |
| h_n | poikkileikkauksen osan korkeus, jossa puristetun liittopilarin taivutuskestävyyden arvo on sama kuin puhtaasti taivutetulla |
| h'_{net} | kokonaisnettolämpövuoto |
| $h'_{net,c}$ | konvektiolla siirtyvä nettolämpövuoto |
| $h'_{net,r}$ | säteilyllä siirtyvä nettolämpövuoto |
| h_E | poikkileikkauksen osan korkeus, jota käytetään yhteisvaikutuskuvaajan tarkentamiseen |
| K_0 | kalibrointikerroin |
| $K_{e,II}$ | korjauskerroin |
| k | liitoksen joustoluku |
| $k_{Ei,\theta}$ | lämpötilasta aiheutuva kimmokertoimen pienneyskerroin materiaalille i |
| $k_{Ei,\theta}$ | lämpötilasta aiheutuva lujuuden pienneyskerroin materiaalille i |

| | |
|-----------------|--|
| L | pilarin korkeus |
| kL | stab. teorian lyhennysmerkintä |
| L_{cr} | pilarin nurjahduspituus |
| $L_{cr,fi}$ | pilarin nurjahduspituus palotilanteessa |
| L_{ij} | kerrospilarin välillä ij korkeus |
| $M_{d,top}$ | taivutusmomentin mitoitusarvo pilarin yläpäässä |
| $M_{d,top,fi}$ | taivutusmomentin mitoitusarvo pilarin yläpäässä palotilanteessa |
| $M_{d,bot}$ | taivutusmomentin mitoitusarvo pilarin alapäässä |
| $M_{d,bot,fi}$ | taivutusmomentin mitoitusarvo pilarin alapäässä palotilanteessa |
| $M_{i,Ed}$ | taivutusmomentti akselin i ympäri |
| M_{Ed} | taivutusmomentin mitoitusarvo |
| $M_{Ed,fi}$ | taivutusmomentin mitoitusarvo palotilanteessa |
| M_i | pisteessä i vaikuttava taivutusmomentti |
| M_{ij} | sauvanpäämomentti pisteessä i kohti pistettä j |
| M_n | lisämomenttikestävyys alueelta $2h_n$ |
| $M_{pl,Rd}$ | poikkileikkauksen taivutuskestävyys ilman puristuskestävyyttä |
| $M_{pl,i,Rd}$ | poikkileikkauksen taivutuskestävyys akselin i ympäri |
| $M_{pl,max}$ | poikkileikkauksen suurin taivutuskestävyys |
| M_{Rd} | liittopilarin taivutusrasitus |
| MK_{ij} | ulkoisen kuormituksen aiheuttama taivutusmomentti pisteessä i kohti pistettä j |
| N | puristuskuorma |
| $N_{c,Rd}$ | betonipoikkileikkauksen plastinen puristuskestävyys |
| N_d | liittopilarin ulkoinen puristuskuorma |
| $N_{d,fi}$ | liittopilarin ulkoinen puristuskuorma palotilanteessa |
| N_{Ed} | liittopilarin puristuskuorma mitoituksessa |
| $N_{Ed,fi}$ | liittopilarin puristuskuorma mitoituksessa palotilanteessa |
| $N_{i,Rd}$ | poikkileikkauksen osan i plastinen puristuskestävyys |
| $N_{pl,Rd}$ | poikkileikkauksen plastinen puristuskestävyys |
| $N_{pm,Rd}$ | betonipoikkileikkauksen plastinen puristuskestävyys |
| P | puristuskuorma |
| q_{ij} | poikittaiskuorma kohtisuorassa pituusakselin suhteen |
| R_{ij} | materiaalin i osan j puristuskestävyysresultantti |
| TS | laskentaohjelmiston aika-askel (time step) |
| t | rakenneteräsputken seinämävahvuus |
| t | kulunut aika |
| α_c | konvektion lämmönsiirtokerroin |
| α_{cc} | betonin lujuuden pienennyskerroin |
| α_{ij} | stab. teorian lyhennysmerkintä |
| α_{ij}^0 | kuorman muodostama kiertymä nivelpäisessä sauvassa |
| α_M | rakenneteräksen lujuuden pienennyskerroin |
| β_{ij} | stab. teorian lyhennysmerkintä |
| β_m | kuormituksesta riippuva ekvivalentti momenttikerroin |
| γ_i | materiaalin i osavarmuuskerroin |
| η_{fi} | palotilanteen yksinkertaistettu kuormituskerroin |
| ΔL_i | materiaalin i lämpöpitenevä |
| ε | liittopilarin puristuma |
| ε_m | rakenneosan pinnan emissiivisyys |
| ε_f | palon säteilykerroin |
| θ | palotilan lämpötila |

| | |
|----------------------|---|
| θ_g | palotilan kaasun lämpötila |
| θ_i | sauvan pään i kiertymä |
| θ_m | materiaalin pinnan lämpötila |
| θ_r | paloympäristön tehollinen säteilylämpötila |
| λ_i | materiaalin i lämmönjohtavuus |
| μ_{di} | akselin i suuntainen suhteellinen taivutusmomentti |
| ν | Poissonin luku |
| ρ | materiaalin tiheys |
| σ_i | materiaalin i jännitys |
| σ | Stefan-Boltzman vakio |
| Φ | näkyvyyskerroin |
| φ_{ij} | sauvan ij sauvanpääkiertymät |
| φ_i | materiaalin i sovituserroin |
| $\varphi_{i,\theta}$ | materiaalin i lämpötilaa θ vastaava kokonaispienennyskerroin |
| ψ_{ij} | sauvan ij päiden välinen siirtymä eli tuen painuma tai venymä |
| ψ_1 | yhdistelykerroin ominaiskuormituksille |
| ψ_2 | yhdistelykerroin pitkäaikaiskuormituksille |

1. JOHDANTO

Liittopilarissa teräsprofiilina on mahdollista käyttää hiiliteräksen sijasta ruostumatonta terästä. Ruostumattomalla teräksellä on mitoituksen näkökulmasta paremmat termiset materiaaliominaisuudet. Yleensä palomitoitus on suunnittelussa määräävä mitoituskriteeri, jolloin liittopilarin lämpötilakentän merkitys korostuu. Tämän työn tarkoituksena on tutkia liittopilarin rakenteellista toimintaa normaali- ja palotilanteessa siten että rakeneteräksen materiaalina on ruostumaton teräs. Lisäksi ruostumattomasta teräsprofiilista valmistetun liittopilarin käyttäytymistä sekä kestävyyttä verrataan yleisesti liittopilarin rakeneteräksenä käytettävään hiiliteräkseen. Työn aihealue rajataan betonitäytteiseen teräsputkiprofiili -liittopilariin.

Ruostumattoman teräksen käyttö liittopilareissa on harvinaista, mutta nykyään niitä suunnitellaan pienissä määrin. Ruostumattoman teräksen korkea hankintahinta verrattuna hiiliteräkseen on ollut suurin käytön rajoittaja. Rakentamisen elinkaarikustannusajattelu on kiinnittänyt huomioita rakenteiden koko elinkaaren aikana muodostuviin kokonaiskuluihin. Ottamalla huomioon ruostumattoman teräksen parempi pitkäaikaiskestävyys ja edullisemmat huoltokustannukset, kokonaiskustannusten erot tasoittuvat ruostumattoman teräksen hyväksi. Lisämaininnan arvoinen detalji on myös ruostumattoman teräksen arkkitehtoninen estetiikka, jonka arvoa voidaan mitata ainoastaan laadullisin perustein. Työn pääpaino on ruostumattoman teräksen rakenneteknisten ominaisuuksien arvioinnissa ja taloudelliset yksityiskohdat jätetään karkeaan kustannusarvioon. [1]

Palotilanteessa ruostumattomalla teräsprofiililla valmistetun betonitäytteisen liittopilarin betonisydämen lämpötila on pienempi kuin mitä se olisi hiiliteräksestä valmistetulla. Liittopilari säilyttää taivutusjäykkyytensä pidempään ruostumattomalla teräsprofiililla. Sen hoikkuus ei suurene yhtä kriittisesti, eikä siitä aiheudu yhtä merkittäviä taivutusrasituksia. Toisen kertaluvun taivutusmomentti on kääntäen verrannollinen pilarin hoikkuuteen, joka on taas kääntäen verrannollinen pilarin nurjahduskestävyyteen. Taivutusjäykkyys vaikuttaa myös pilarin nurjahduspituuteen, mikäli kyseessä on monikerrospilari. Palotilassa sijaitsevan pilarin taivutusjäykkyys on pienempi kuin sitä ylemmän ja alemman kerroksen pilarien taivutusjäykkyydet ja muodonmuutoksista aiheutuva taipumaviiva muuttuu siten että pilarin nurjahduspituus pienenee. Lisäksi osa palotilassa olevan pilarin taivutusmomentista siirtyy ylempään ja alempaan pilariin. Työssä pyritään selvittämään, kuinka merkittävää on taivutusrasitusten uudelleen jakautuminen ja nurjahduspituuksien pienentyminen, kun palomitoituksessa otetaan huomioon pilarin pienentyneet jäykkyystekijät.

Standardissa SFS-EN 1994-1-2 on esitetty palosuunnittelussa käytettävät nurjahduspituudet. Niissä ei oteta huomioon pilarin jäykkyyttä tai palorasituksen kestoja. Arvot perustuvat väittämään, jonka mukaan palotilassa olevan pilarin jäykkyys on vain murto-osan siihen liittyvien palotilan ulkopuolella sijaitsevien pilareiden jäykkyydestä. Todellisuudessa

jäykkyys ei laske niin merkittävästi kuin mitä standardi antaisi ymmärtää. Tässä työssä analysoidaan monikerrosliittopilarin nurjahduspituutta laskennallisesti ja niitä verrataan standardissa SFS-EN 1994-1-2 esitettyihin lukuarvoihin. [12]

Liitopilarien laskennallisia kestävyyskäsitteitä vertaillaan varioimalla teräsprofiilin teräslaatuja hiiliteräksen ja ruostumattomien teräslajien välillä. Pilaria kuormitetaan tasaisesti kasvavalla normaalivoimalla, kunnes saavutetaan 100 % käyttöaste. Laskelmat kestävyyksille suoritetaan sekä pyöreän että neliön muotoisille liittopilaripoikkileikkauksille muutamalla tavanomaisella teräsprofiilipoikkileikkauksella. Lisäksi muuttujina käytetään pilarin korkeutta, normaalivoiman epäkeskeisyyttä sekä betoniraudoitusta. Kestävyyskäsitteitä vertailemalla pyritään selvittämään, että minkälaisiin tilanteisiin ruostumattomasta teräsprofiilista valmistettu liittopilari soveltuu kustannustehokkaasti.

2. LIITTOPILARIN RAKENTEELLINEN TOIMINTA

Liittopilarien pääasiallinen tehtävä on viedä rakennuksen pystykuormat perustuksille. Suomessa niitä on käytännössä rakennusosien omapaino, välipohjien hyötykuormat ja kattojen lumikuormat. Paikallisesti liittopilareille voidaan myös sallia vaakakuormia, kuten tuulta ja onnettomuuskuormia sekä rakennusjärjestelmän vinoudesta, kiertymästä tai muusta epäkeskeisyydestä aiheutuvia vaakakuormia. Standardi SFS-EN 1994-1-2 rajaa liittopilarin käyttöä jäykistävänä rakenteena vain kehittyneisiin laskentamalleihin. Yksinkertaisella laskentamenetelmällä suunniteltuja jäykistäviä liittopilareita ei sallita.

Erillisen jäykistysjärjestelmän etuina on, että rakennejärjestelmä voidaan yksinkertaistaa perustapauksessa kaksiulotteiseksi. Lisäksi liitokset voidaan pitää rakenteeltaan yksinkertaisina ja nivelellisinä, jolloin liittopilareiden taivutusrasitukset ovat pienempiä. Taivutusrasituksia syntyy tällöin lähinnä rakenteen epätäydellisyydestä ja hyötykuormien liikkuvuudesta. Voimasuureet selvitetään yleensä lineaarisen kimmoteorian mukaisella rakenneanalyysillä, jolloin laskennassa käytetään globaalin rakennejärjestelmän alkupeistä geometriaa. SFS-EN 1994-1-1 vaatii, että lineaarista kimmoteoriaa käyttäessä varmuus kriittiseen kuormitukseen on kymmenen tai enemmän. Mikäli ehto jää täyttämättä, on laskenta suoritettava toisen kertaluvun mukaisella analyysillä, joka on merkittävästi työläämpä ja se vaatii käytännössä FEM-ohjelmiston käyttöä. [3][6]

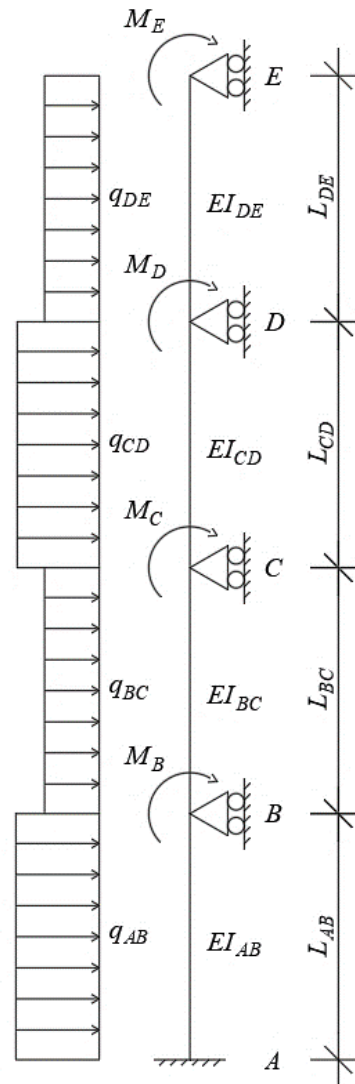
Globaalin rakenneanalyysin tuloksista saadaan liittopilarille mitoituskuormat. Tähän lisätään vielä lokaalit epätarkkuudet eli vinous ja käyryys. Lisäksi otetaan huomioon mahdolliset toisen kertaluvun vaikutukset, mikäli pilarin lokaalin mitoituskuorman ja nurjahduskuormituksen välinen suhde on alle kymmenen. Liittopilariin otaksutaan kehittyvän murtotilanteessa täysi plastisuusteorian mukainen puristuskestävyys, kunhan nurjahdus tai paikallinen lommahdus ei tapahdu sitä ennen.

2.1 Pilarin toiminta palotilanteessa

Monikerrosrakennukset suunnitellaan siten, että välipohjat osastoivat rakennuksen päällekkäiset kerrokset. Tulipalon sattuessa oletetaan, että osastoiva rakenne täyttää sillä asetetut eristävyys- ja tiiveyskriteerit. Niitä merkitään kirjaimilla I ja E mainitsemisjärjestyksessä. Tämä rajoittaa palon leviämistä ja suunnittelussa voidaan olettaa, että palo ei leviä muihin osastoihin määrätyn palonkestoajan sisällä. Suuremmissa rakennuskokonaisuuksissa käytetään myös osastoivuutta rakennuksen leveyssuunnassa. Palosuunnittelun lähtökohtana on, että rakennuksessa voi vaikuttaa vain yksi tulipalo kerrallaan. Se, että tulipaloja syttyy kaksi tai enemmän täysin toisistaan riippumatta on hyvin epätodennäköistä.

Palotilanteessa sivusuunnassa tuetun kehän taipumaviiva muuttuu. Palotilassa sijaitsevan jatkuvan pilarin taivutusjäykkyys on merkittävästi pienempi kuin normaalilämpötilassa oleva pilari. Tästä syystä palotilassa olevaa pilaria voidaan pitää jäykästi tuettuna molemmista päistä ja pilarin nurjahduspituus pienenee. Välipohjalta muodostuvat taivutusrasitukset voidaan niin ikään jakaa ylä- ja alapuolisille pilareille. Samalla tavalla kuin puristuksessa tai vedossa kuormitus jakaantuu rakenneosien aksiaalijäykkyyksien suhteessa, niin myös taivutusjäykkyys jakaantuu taivutusjäykkyyksien suhteessa pilareille. [4][5]

Kuvassa 2.1 on esitetty nelikerroksisen rakennuksen keskipilari. Pilari on staattisesti jatkuva ja siihen muodostuu kerroksien tasokuormista sekä yläpohjan lumikuormasta taivutusmomenttia. Pilari on jäykästi kiinnitetty perustuksiin ja nivelellisesti välipohjiin sekä yläpohjaan. Merkitään perustusta A, välipohjia B, C ja D ja yläpohjaa E. Lisäksi merkitään pilarin kerrosväliä pisteiden A ja B välillä L_{AB} sekä taivutusjäykkyyttä EI_{AB} . Sen yläpäähän muodostuu pistemomentti M_B ja vaakasuunnassa kerrosväliä kuormittaa tasainen viivakuorma q_{AB} . Vastaavasti merkitään myös muut kerrosvälit ja pistemomentit.



Kuva 2.1 Monikerrospilarin rakennemalli.

Ratkaistaan rakenteen momenttikuvaja siirtymämenetelmällä. Sen peruslause on

$$M_{ij} = \frac{2EI_{ij}}{L_{ij}} (2\theta_i + \theta_j + 3\psi_{ij}) + MK_{ij}, \quad (2.1)$$

missä EI_{ij} on sauvan taivutusjäykkyys,

L_{ij} on sauvan pituus,

θ_i on sauvan pään i kiertymä,

θ_j on sauvan pään j kiertymä,

ψ_{ij} on päiden i ja j välinen siirtymä eli tuen painuma tai venymä ja

MK_{ij} on ulkoisen kuormituksen aiheuttama taivutusmomentti sauvan päässä i.

Kuvan 2.1 tapauksessa kaava (2.1) yksinkertaistuu muotoon

$$M_{ij} = \frac{2EI_{ij}}{L_{ij}} (2\theta_i + \theta_j) + MK_{ij}, \quad (2.2)$$

ja sauvanpäämomentit voidaan kirjoittaa matriisimuodossa

$$\mathbf{M} = 2 \begin{bmatrix} 0 & -\frac{EI_{AB}}{L_{AB}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\frac{EI_{AB}}{L_{AB}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2\frac{EI_{BC}}{L_{BC}} & -\frac{EI_{BC}}{L_{BC}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{EI_{BC}}{L_{BC}} & 2\frac{EI_{BC}}{L_{BC}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\frac{EI_{CD}}{L_{CD}} & -\frac{EI_{CD}}{L_{CD}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{EI_{CD}}{L_{CD}} & 2\frac{EI_{CD}}{L_{CD}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2\frac{EI_{DE}}{L_{DE}} & -\frac{EI_{DE}}{L_{DE}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{EI_{DE}}{L_{DE}} & 2\frac{EI_{DE}}{L_{DE}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_A \\ \theta_B \\ \theta_C \\ \theta_D \\ \theta_E \end{bmatrix} + \frac{1}{12} \begin{bmatrix} q_{AB}L_{AB}^2 \\ -q_{AB}L_{AB}^2 \\ q_{BC}L_{BC}^2 \\ -q_{BC}L_{BC}^2 \\ q_{CD}L_{CD}^2 \\ -q_{CD}L_{CD}^2 \\ q_{DE}L_{DE}^2 \\ -q_{DE}L_{DE}^2 \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Momenttiehdot ovat

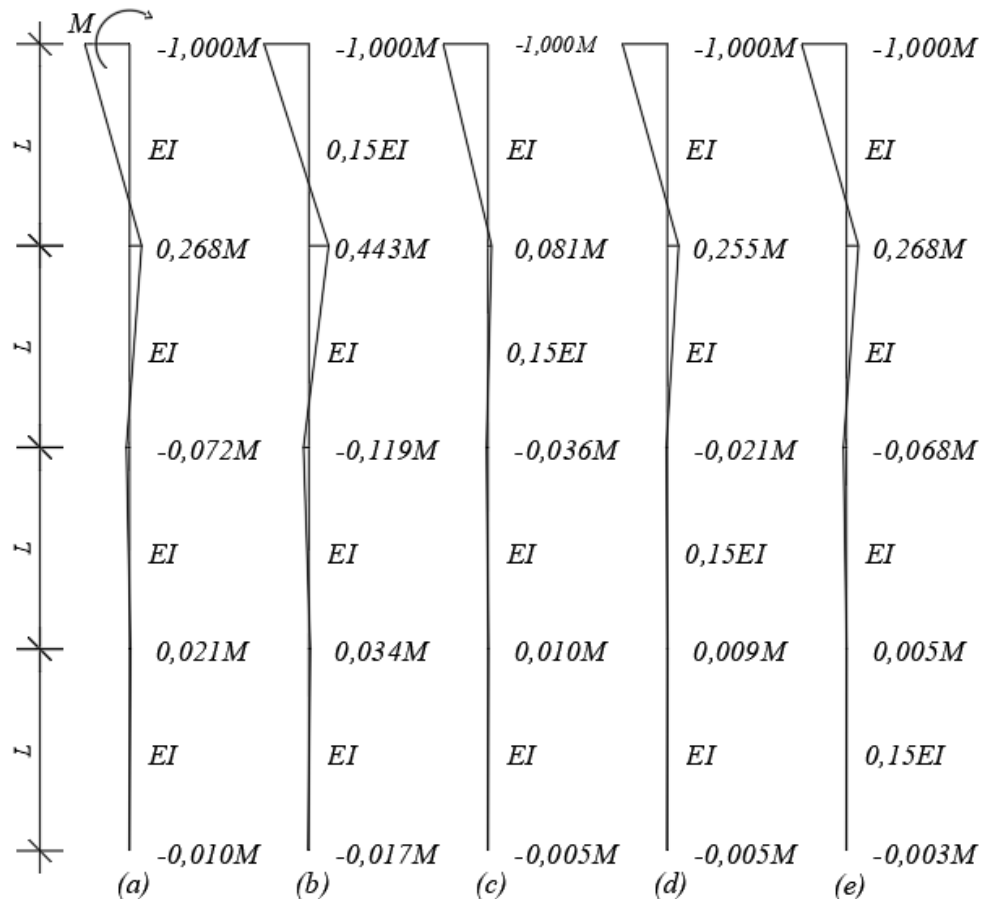
$$\begin{bmatrix}
 1 & 2 \frac{EI_{AB}}{L_{AB}} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 4 \frac{EI_{AB}}{L_{AB}} + 4 \frac{EI_{BC}}{L_{BC}} & 2 \frac{EI_{BC}}{L_{BC}} & 0 & 0 \\
 0 & 2 \frac{EI_{BC}}{L_{BC}} & 4 \frac{EI_{BC}}{L_{BC}} + 4 \frac{EI_{CD}}{L_{CD}} & 2 \frac{EI_{CD}}{L_{CD}} & 0 \\
 0 & 0 & 2 \frac{EI_{CD}}{L_{CD}} & 4 \frac{EI_{CD}}{L_{CD}} + 4 \frac{EI_{DE}}{L_{DE}} & 2 \frac{EI_{DE}}{L_{DE}} \\
 0 & 0 & 0 & 2 \frac{EI_{DE}}{L_{DE}} & 4 \frac{EI_{DE}}{L_{DE}}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 \theta_B \\
 \theta_C \\
 \theta_D \\
 \theta_E
 \end{bmatrix} =
 \begin{bmatrix}
 -\frac{q_{AB}L_{AB}^2}{12} \\
 -M_B - \frac{q_{BC}L_{BC}^2}{12} + \frac{q_{AB}L_{AB}^2}{12} \\
 -M_C - \frac{q_{CD}L_{CD}^2}{12} + \frac{q_{BC}L_{BC}^2}{12} \\
 -M_D - \frac{q_{DE}L_{DE}^2}{12} + \frac{q_{CD}L_{CD}^2}{12} \\
 -M_E + \frac{q_{ED}L_{ED}^2}{12}
 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Tilanteessa, jossa pilariin vaikuttaa pistemomentti vain yläpohjalta sekä pilarien korkeudet ja taivutusjäykkyyydet ovat vakioita, saadaan kuvan 2.2(a) mukainen taivutusmomenttikuvaaja. Kuvan 2.2 taivutusmomenttikuvaajat (b), (c), (d) ja (e) ovat palotilanteista, joissa yhden palo-osastoivan kerrosvälin liittopilari on alttiina palolle ja palotilassa sijaitsevan liittopilarin taivutusjäykkyys on oletettu olevan 15 % normaalilämpötilan taivutusjäykkyyydestä. Se on yksinkertaistus tavanomaiselle liittopilaripoikkileikkaukselle, jonka teräsprofiilin materiaali on tavanomaista hiiliterästä standardipalossa R60. Palotilanteessa ruostumattomalla teräsprofiililla valmistetulla liittopilaripoikkileikkauksella vastaava oletus ei pidä paikkaansa vaan taivutusjäykkyys on merkittävästi suurempi ja vaihtelee 30 % ja 70 % välillä. Asiaa tutkitaan yksityiskohtaisemmin kappaleessa 2.2.

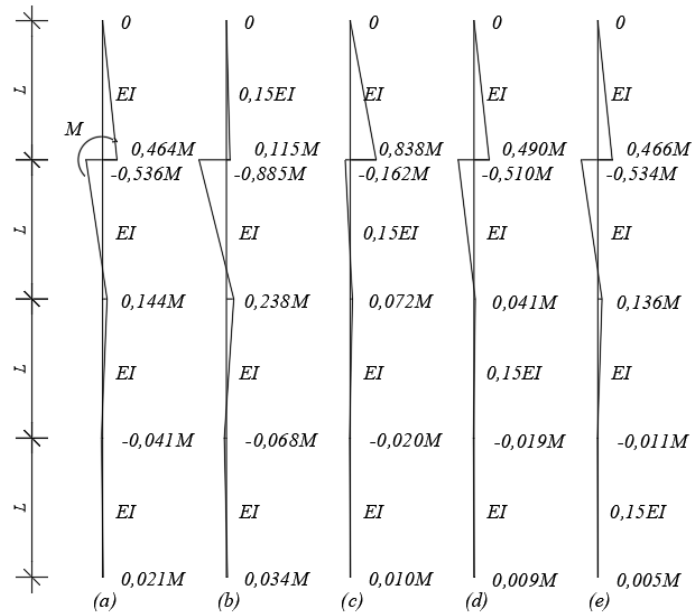
Momenttikuvaajista voidaan nähdä, että rasitukset jakaantuvat rakenteille niiden jäykkyyksien suhteessa, jos mahdollista. Esimerkiksi kuvan 2.2(b) tapauksessa momentti ei jakaudu vaan itseasiassa kasvattaa pilarin alapään momenttirasitusta. Suunnittelussa tämä ei kuitenkaan kasvata kokonaisrasituksia, sillä ilmiö muuttaa momenttipintaa symmetrisemmäksi pilarin korkeuslinjan suhteen. Se pienentää ekvivalenttia momenttikerrointa β_m tässä tapauksessa arvosta 0,54 arvoon 0,47 eli laskee 13 %. Ensimmäisen kertaluvun mitoitusmomenttiin päästään kertomalla liittopilarin suurempi ala- tai yläpään momentti ekvivalentilla momenttikertoimella ja lisäämällä epätarkkuuksista aiheutuva taivutusmomentti.

Kuvassa 2.3 on taivutusmomenttikuvaajat kuvan 2.2 tapaan, mutta pistemomentti on siirretty yhden kerrosvälin alemmaksi. Tässä tapauksessa nähdään suoraan kuvista 2.3(b) ja 2.3(c), että palotilanteessa momenttipinta muuttuu edullisemmaksi palotilassa olevalle liittopilarille. Sama ilmiö toistuu myös alemmissa kerroksissa, kun pistemomentti siirretään alempiin välipohjiin.

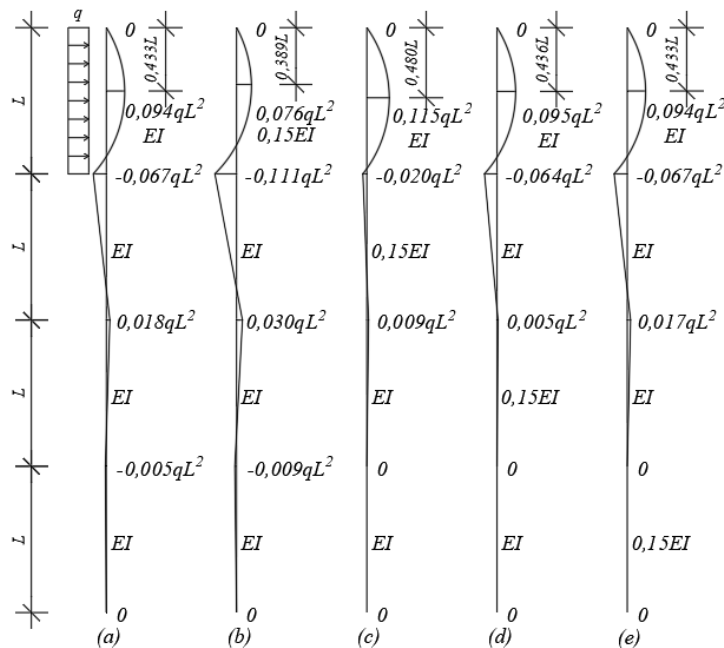
Momenttipinnan siirtyminen tapahtuu myös kerrosvälin keskialueelle vaikuttavilla piste-kuormalla, tasaisella vaakakuormalla tai pistemomentilla kuten tuulikuormalla, törmäyksellä tai tukikonsolilla, mutta niiden vaikutukset eivät tuota yhtä selkeitä eroja kuin kuvien 2.2 ja 2.3 tilanteissa. Nyrkkisääntönä voidaan sanoa, että ne kasvattavat momenttirasituksen itseisarvoa tuella ja pienentävät kerrosvälin taivutusmomentin arvoa. Esimerkiksi kuvan 2.4(a) tapauksessa, jossa ylintä kerrosväliä kuormittaa tasainen vaakakuorma, kerroksen kenttämomentti laskee arvosta $0,094 \cdot qL^2$ arvoon $0,076 \cdot qL^2$ eli n. 19,5 %. Mutta tukimomentti ylimmän välipohjan tasolla kasvaa itseisarvoltaan arvosta $-0,067 \cdot qL^2$ arvoon $-0,111 \cdot qL^2$ eli 66%. Tämä on esitetty kuvassa 2.4. Kuvassa 2.5 on esitetty tapaus, jossa vaakakuorma vaikuttaa pisteiden C ja D välissä. Voimien jakaantuminen on sama kuin kuvan 2.4 tapauksessa: taivutusmomenttien arvot pienenevät kerrosvälin keskialueella ja kasvavat tukien läheisyydessä. Tilanteet, jossa pistemomentti on pisteissä C ja D sekä tasainen vaakakuorma kahdella alimmalla kerrosvälillä on esitetty liitteessä 1.



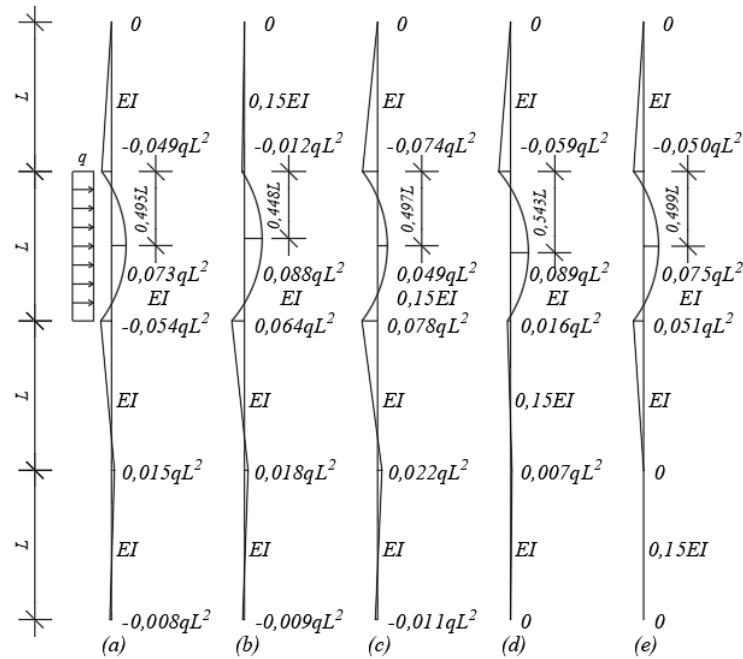
Kuva 2.2 Kuvassa 2.1 esitetyn monikerospilarin taivutusmomenttikuvaajat, kun pilarin yläpäässä vaikuttaa pistemomentti $M_E = M$. Rakenteeseen ei vaikuta muita pistemomentteja (M_B , M_C ja M_D) tai ulkoista vaakakuormaa q . Taivutusmomenttikuvaajat on piirretty myös olettaen, että palo vaikuttaa pilariin ja pienentää pilarin taivutusjäykkyyttä välillä (b) D-E, (c) C-D, (b) B-C ja (e) A-B.



Kuva 2.3 Kuvassa 2.1 esitetyn monikerrospilarin taivutusmomenttikuvaajat, kun pilarin pisteessä D vaikuttaa pistemomentti $M_D = M$. Rakenteeseen ei vaikuta muita pistemomenteja (M_B , M_C ja M_E) tai ulkoista vaakakuormaa q . Taivutusmomenttikuvaajat on piirretty myös olettaen, että palo vaikuttaa pilariin ja pienentää pilarin taivutusjäykkyyttä välillä (b) D-E, (c) C-D, (b) B-C ja (e) A-B.



Kuva 2.4 Kuvassa 2.1 esitetyn monikerrospilarin taivutusmomenttikuvaajat, kun pilarin ylämpään kenttään vaikuttaa ulkoinen vaakakuorma $q_{DE} = q$. Rakenteeseen ei vaikuta pistemomenteja tai muita ulkoisia vaakakuormia (q_{CD} , q_{BC} ja q_{AB}). Taivutusmomenttikuvaajat on piirretty myös olettaen, että palo vaikuttaa pilariin ja pienentää pilarin taivutusjäykkyyttä välillä (b) D-E, (c) C-D, (b) B-C ja (e) A-B.



Kuva 2.5 Kuvassa 2.1 esitetyn monikerrospilarin taivutusmomenttikuvaajat, kun pilarivälille C-D vaikuttaa ulkoinen vaakakuorma $q_{CD} = q$. Rakenteeseen ei vaikuta pistemomentteja tai muita ulkoisia vaakakuormia (q_{DE} , q_{BC} ja q_{AB}). Taivutusmomenttikuvaajat on piirretty myös olettaen, että palo vaikuttaa pilariin ja pienentää pilarin taivutusjäykkyyttä välillä (b) D-E, (c) C-D, (b) B-C ja (e) A-B.

2.2 Liittopilarin jäykkyys palotilanteessa

Normaalilämpötila- ja palomitoituksessa liittopilarin otaksutaan olevan täydellisessä liittovaikutuksessa. Se tarkoittaa, että teräsprofiili ja betoni eivät liu'u toistensa suhteen taipumien muodostuessa ja tämän seurauksena liittopilarin laskennassa voidaan käyttää liittorakenteille tuttua Euler-Bernoulli -palkkiteoriaa, joka nykyään tunnetaan teknisenä taivutusteorianä. Täydellinen liittovaikutus otaksutaan myös muille liittopilaripoikkileikkauksille kuin betonilla täytetyille teräspalkkiprofiilille.

Liittopilarin tehollinen taivutusjäykkyys lasketaan standardin SFS-EN 1994-1-1 kohdan 6.7.3.4(2) mukaan normaalilämpötilassa kaavalla

$$EI_{eff,II} = K_0(E_a I_a + E_s I_s + K_{e,II} E_{cm} I_c). \quad (2.5)$$

missä K_0 on kalibrointikerroin, jonka arvo on 0,9,

E_i materiaalin i kimmomoduuli,

I_i poikkileikkauksen i neliömomentti ja

$K_{e,II}$ on korjauskerroin, jonka arvo on 0,5.

Betonin sekanttikimmokerroin E_{cm} ei käytetä edellisessä kaavassa suoraan vaan sille tehdään vielä korjaus SFS-EN 1994-1-1 kohdan 6.7.3.3(4) mukaan, joka ottaa huomioon betonin viruman. Korjattua kimmokerrointa merkitään $E_{c,eff}$. On tulkinnanvaraista, että tuleeko betonin kimmokerrointa korjata myös taivutusjäykkyyden ominaisarvon EI_{eff} laskennassa. Tässä työssä EI_{eff} laskiessa betonin kimmokertoimeen otetaan huomioon viruma varmuuden vuoksi. Taivutusjäykkyyden ominaisarvon laskentaa tehdään myöhemmänä tässä työssä. [3]

Palotilanteessa liittopilarin tehollinen taivutusjäykkyys lasketaan standardin SFS-EN 1994-1-2 kohdan 4.3.5.1(5) mukaan kaavalla

$$EI_{fi,eff} = \sum_j (\varphi_{a,\theta} E_{a,\theta} I_{a,\theta}) + \sum_k (\varphi_{s,\theta} E_{s,\theta} I_{s,\theta}) + \sum_m (\varphi_{c,\theta} E_{c,sec,\theta} I_{c,\theta}). \quad (2.6)$$

missä $\varphi_{i,\theta}$ materiaalin i lämpötilaa θ vastaava kokonaispienennyskerroin,

$E_{i,\theta}$ materiaalin i lämpötilaa θ vastaava kimmomoduuli,

$I_{i,\theta}$ poikkileikkauksen tehollisen osan i lämpötilaa θ vastaava neliömomentti taivutettaessa ja

$E_{c,sec,\theta}$ on betonin lämpötilaa θ vastaava sekanttikimmokerroin.

Pienennyskertomella otetaan huomioon, että lämpötila on poikkileikkauksen sisällä epätasaisesti jakautunut. Todellinen tarve pienennyskertomelle on betonipoikkileikkauksen taivutusjäykkyyttä määrittäessä. Betonin lämpötila on sen reunalla merkittävästi suurempi, kuin keskipisteessä. Betonin kimmokertoimen pieneneminen on myös epälineaarinen, jolloin esimerkiksi paloluokassa R60 betonipoikkileikkauksen keskiosan kimmokerrointa ei ole yleensä tarvetta pienentää ja ulkopinnan lähistöllä sitä pienennetään merkittävästi. Pienennyskertoimet $\varphi_{i,\theta}$ koskevat materiaalin osan i kokonaisjäykkyyden pienennystä eivätkä yksittäisen poikkileikkauksalkio taivutusjäykkyyden pienennystä, joihin käytetään standardin SFS-EN 1994-1-2 kertoimia $k_{i,\theta}$. Kaavan (2.6) on suunniteltu laskentatyön helpottamiseksi ja taulukkolaskentaa silmällä pitäen. Poikkileikkaus on mahdollista jakaa myös pieniin alkioihin, jolloin pienennyskertoimet $\varphi_{i,\theta}$ ovat suuruudeltaan 1,0, mutta laskennan määrä kasvaa merkittävästi. Tässä työssä liittopilaripoikkileikkauksen betoniosa jaetaan vyöhykkeisiin. Erityishuomion arvoinen asia on, että kaavassa (2.6)

ei oteta huomioon betonin pitkäaikaisvaikutuksia. Palotilanteessa ei oteta huomioon betonin virumaa. [12]

Standardipalossa betonitäytteisessä putkiprofiililiittopilarissa ulkoinen teräsprofiili on käytännössä vakioämpötilassa sen korkean lämmönjohtavuuden myötä. Sama tilanne on myös luonnollisen palon malleissa, joissa liittopilarin kuumenee joka puolelta yhtä paljon. Tällaisessa tapauksessa yksinkertaisin ja varmalla puolella oleva laskentatapa on otaksua teräsprofiilin olevan kokonaan samassa lämpötilassa kuin sen ulkopinta. Laskennassa voidaan käyttää teräsprofiilin alkuperäistä geometriaa, kokonaisjäykkyyden pienennyskertoimen arvoa 1,0 ja kimmokertoimen lämpötilasta aiheutuva pienennyskerroin saadaan suoraan standardeista SFS-EN 1994-1-2 tai SFS-EN 1993-1-4. Yksinkertaistuksessa käytetään edellä mainitun kokonaisjäykkyyden pienennyskertoimen $\varphi_{a,\theta}$ sijasta kimmokertoimen pienennyskerrointa $k_{E,\theta}$. Kimmokertoimen ja myötölujuuden pienennyskerroimet esitetään käytettäville materiaaleille kappaleessa 3.2. [12][10]

Standardit SFS-EN 1994-1-1 ja SFS-EN 1994-1-2 eivät ohjeista liittopilaripoikkileikkauksen aksiaalijäykkyyden laskennassa. Aksiaalijäykkyyttä ei tarvita mitoituksessa. Arvioidaan liittopilarin taivutusjäykkyys kaavojen (2.5) ja (2.6) logiikalla, kuitenkin ilman kalibrointi- ja korjauskertoimia K_θ ja $K_{e,II}$, sillä ne liittyvät taivutukseen ja halkeiluun. Lisäksi otetaan huomioon, että palotilanteessa poikkileikkaus jaetaan pieniin alkioihin, jolloin kokonaisjäykkyyden korjauskertoimen arvo on 1,0. Aksiaalijäykkyys normaaliämpötilassa lasketaan kaavalla

$$EA_{eff} = E_a A_a + E_s A_s + E_{c,eff} A_c, \quad (2.7)$$

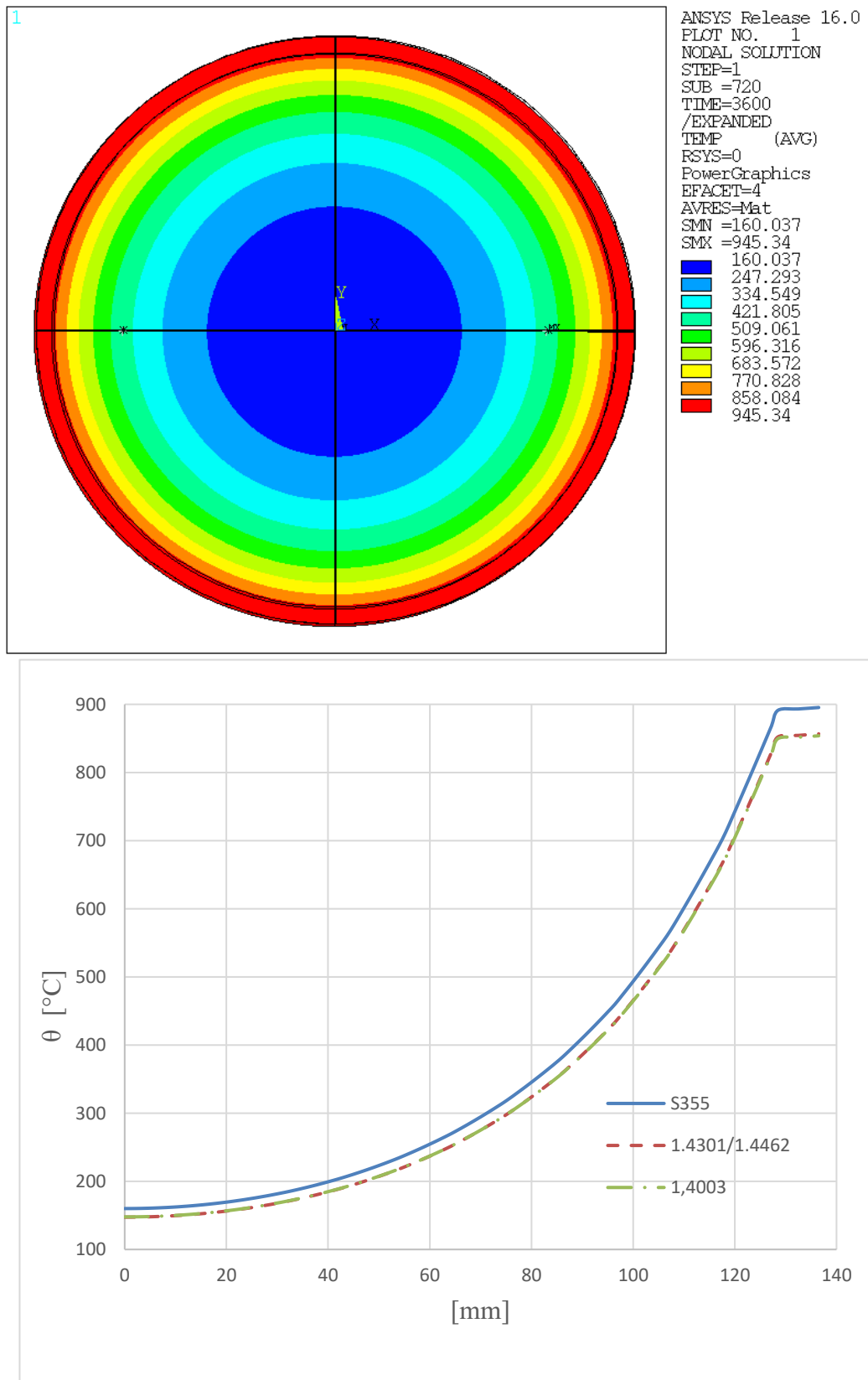
missä A_i poikkileikkauksen i pinta-ala.

ja palotilanteessa kaavalla

$$EA_{fi,eff} = \sum_j (E_{a,\theta} A_{a,\theta}) + \sum_k (E_{s,\theta} A_{s,\theta}) + \sum_m (E_{c,sec,\theta} A_{c,\theta}). \quad (2.8)$$

missä $A_{i,\theta}$ poikkileikkausalkion i lämpötilaa θ vastaava pinta-ala. [3][12]

Poikkileikkauksen lämpötila lasketaan ANSYS -laskentaohjelmistolla ja laskennan sisältö avataan yksityiskohtaisemmin kappaleessa 5.2. Kuvassa 2.6 on esitetty poikkileikkauksen CHS 273x8,0 lämpötila alkaen poikkileikkauksen keskipisteestä teräsprofiilin ulkopintaan. Teräsprofiilin teräslaji on S355 ja paloluokka R60. Lisäksi kuvaajassa on esitetty austeniittisella ja ferriittisellä teräsprofiililla valmistetun liittopilarin lämpötilan ja paikan väliset kuvaukset. Käytännössä ne ovat lähes identtiset.



Kuva 2.6 Liittopilaripoikkileikkauksen CHS 273x8,0 lämpötila hiiliteräksellä paloluokassa R60 sekä sijainnin ja lämpötilan kuvaukset hiiliteräksellä ja käytettävillä ruostumattomilla teräslaaduilla.

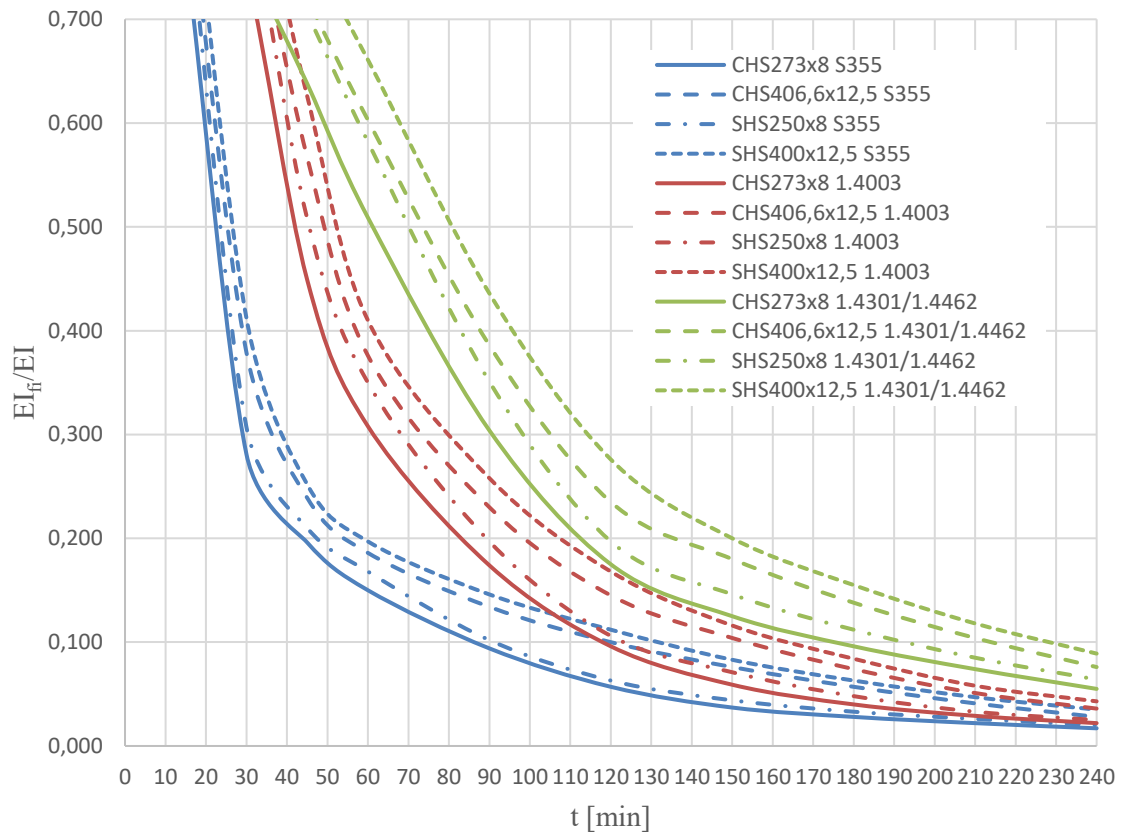
Kuvassa 2.7 ja taulukossa 2.1 on esitetty tavanomaisten betonitäytteisten teräsputkiliittopilaripoikkileikkauksien taivutusjäykkyysien suhde normaalilämpötilan ja palotilanteen välillä. Lisäksi teräslajia on varioitu rakenneteräksen S355 sekä terässtandardien EN 1.4003, EN 1.4301 ja EN 1.4462 mukaisten teräslajien välillä. Liittopilaripoikkileikkauksen betoniluokka on C40/50 ja betoniteräs B500B. Tässä työssä ruostumattomiin teräslajeihin viitataan jäljempänä vain niiden numerotunnuksella eli esimerkiksi 1.4003, 1.4301 ja 1.4462.

Pilarin taivutusjäykkyyydestä normaalilämpötilassa merkittävä osa on teräsprofiilissa, joka kuumenee nopeammin kuin liittopilarin betonisydän palon kehittyessä. Tämä aiheuttaa liittopilarin taivutusjäykkyysien nopean pientymisen. Teräslajeilla 1.4301 ja 1.4462 on sama ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus ja kimmokerroin, jolloin niiden taivutusjäykkyys on sama. Kuvasta 2.7 ilmenee, että taivutusjäykkyys pienenee nopeammin pienemmillä liittopilaripoikkileikkauksilla. Teräslajilla S355 taivutusjäykkyyydestä on 60 minuutin palon jälkeen jäljellä n. 15 – 20 % ja 120 minuutin jälkeen n. 5 – 10 %. Teräslajilla 1.4003 60 minuutin palon jälkeen 30 – 40 % ja 120 minuutin jälkeen 10 – 20 %. Teräslajeilla 1.4301 ja 1.4462 vastaavat arvot 60 minuutin jälkeen ovat 50 – 65 % ja 120 minuutin jälkeen 15 – 30 %. Palotilanteessa teräslaji 1.4003 säilyttää taivutusjäykkyytensä keskimäärin 13,5 % ja teräslajit 1.4301 ja 1.4462 keskimäärin 22,1 % paremmin kuin teräslajilla S355. Nämä vaikutukset vielä kertaantuvat toisen kertaluvun mitoitusmomenttia laskettaessa. Palomitoituksessa toisen kertaluvun vaikutukset ovat merkittävät.

Kuvassa 2.8 ja taulukossa 2.2 on esitetty samojen liittopilaripoikkileikkauksien puristusjäykkyysien muutos palon edetessä. Lisäksi betoniraudoitus, betoniluokka sekä suoja-betonipaksuus ja muut lähtöparametrit ovat samat. Puristusjäykkyysien pientyminen palotilassa olevissa liittopilareissa ei voida hyödyntää mitoituksessa samalla tavalla, koska puristuksella ei ole vaihtoehtoisia tapoja sijoittua kuten taivutusmomentilla on. Samaa tapaan voidaan havainnoida, että kuten taivutusjäykkyysien tapauksessa myös puristusjäykkyys pienenee nopeammin pienemmillä poikkileikkauksilla. Teräslajilla S355 puristusjäykkyyydestä on 60 minuutin palon jälkeen jäljellä n. 20 – 30 % ja 120 minuutin jälkeen n. 5 – 15 %. Teräslajilla 1.4003 60 minuutin palon jälkeen 30 – 45 % ja 120 minuutin jälkeen 10 – 20 %. Teräslajeilla 1.4301 ja 1.4462 vastaavat arvot 60 minuutin jälkeen ovat 40 – 55 % ja 120 minuutin jälkeen 15 – 25 %. Palotilanteessa teräslaji 1.4003 säilyttää taivutusjäykkyytensä keskimäärin 7,5 % ja teräslajit 1.4301 ja 1.4462 keskimäärin 11,6 % paremmin kuin teräslaji S355. Keskiarvot on laskettu taulukoiden 2.1 ja 2.2 vastaavien solujen erotusten keskiarvona.

Taulukko 2.1 Palotilassa olevan liittopilaripoikkileikkauksen taivutusjäykkyyden suhde normaalilämpötilaan erällä liittopilaripoikkileikkauksilla. Betoniluokka C40/50 ja betoniraudituksen luokka B500B.

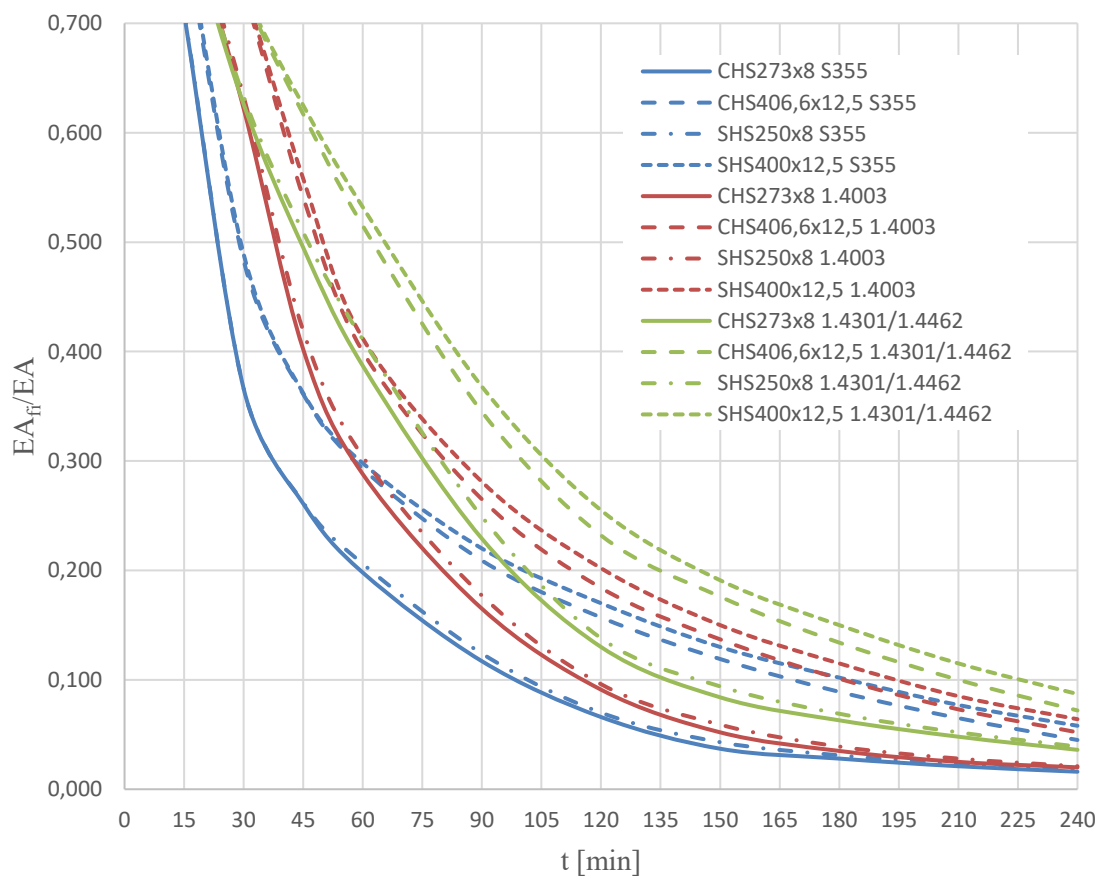
| R [min] | CHS 273x8,0, 8T20, c=20 | CHS 406,4x12,5, 8T25, c=40 | SHS250x250x8,0, 8T20, c=20 | SHS 400x400x12,5, 8T25, c=40 | |
|---------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 15 | 0.767 | 0.844 | 0.824 | 0.895 | S355 |
| 30 | 0.281 | 0.379 | 0.307 | 0.412 | |
| 60 | 0.150 | 0.186 | 0.168 | 0.197 | |
| 90 | 0.094 | 0.134 | 0.102 | 0.146 | |
| 120 | 0.057 | 0.100 | 0.063 | 0.112 | |
| 180 | 0.028 | 0.057 | 0.033 | 0.063 | |
| 240 | 0.017 | 0.028 | 0.020 | 0.035 | |
| 15 | 0.949 | 1.004 | 1.021 | 1.057 | 1.4003 |
| 30 | 0.748 | 0.831 | 0.819 | 0.880 | |
| 60 | 0.308 | 0.376 | 0.350 | 0.410 | |
| 90 | 0.174 | 0.230 | 0.197 | 0.258 | |
| 120 | 0.096 | 0.145 | 0.106 | 0.168 | |
| 180 | 0.040 | 0.074 | 0.048 | 0.084 | |
| 240 | 0.022 | 0.036 | 0.025 | 0.043 | |
| 15 | 0.932 | 0.982 | 1.006 | 1.038 | 1.4301 / 1.4462 |
| 30 | 0.765 | 0.835 | 0.832 | 0.884 | |
| 60 | 0.509 | 0.603 | 0.582 | 0.661 | |
| 90 | 0.304 | 0.386 | 0.351 | 0.436 | |
| 120 | 0.175 | 0.235 | 0.197 | 0.276 | |
| 180 | 0.096 | 0.138 | 0.112 | 0.155 | |
| 240 | 0.055 | 0.076 | 0.064 | 0.089 | |



Kuva 2.7 Taulukon 2.1 arvot esitetty kuvaajana

Taulukko 2.2 Palotilassa olevan liittopilarin puristusjäykkyyden suhde normaalilämpötilaan. Betoniluokka C40/50 ja betoniraudoituksen luokka B500B.

| R [min] | CHS 273x8,0, 8T20, c=20 | CHS 406,4x12,5, 8T25, c=40 | SHS250x250x8,0, 8T20, c=20 | SHS 400x400x12,5, 8T25, c=40 | |
|---------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 15 | 0.709 | 0.782 | 0.711 | 0.790 | S355 |
| 30 | 0.366 | 0.483 | 0.366 | 0.489 | |
| 60 | 0.198 | 0.293 | 0.206 | 0.298 | |
| 90 | 0.117 | 0.209 | 0.124 | 0.220 | |
| 120 | 0.066 | 0.157 | 0.070 | 0.170 | |
| 180 | 0.028 | 0.089 | 0.031 | 0.102 | |
| 240 | 0.016 | 0.045 | 0.018 | 0.058 | |
| 15 | 0.816 | 0.875 | 0.824 | 0.881 | 1.4003 |
| 30 | 0.622 | 0.729 | 0.633 | 0.733 | |
| 60 | 0.288 | 0.400 | 0.304 | 0.412 | |
| 90 | 0.165 | 0.265 | 0.177 | 0.281 | |
| 120 | 0.091 | 0.184 | 0.096 | 0.202 | |
| 180 | 0.035 | 0.101 | 0.039 | 0.115 | |
| 240 | 0.020 | 0.052 | 0.021 | 0.064 | |
| 15 | 0.803 | 0.860 | 0.810 | 0.866 | 1.4301 / 1.4462 |
| 30 | 0.626 | 0.727 | 0.633 | 0.730 | |
| 60 | 0.387 | 0.515 | 0.411 | 0.532 | |
| 90 | 0.229 | 0.345 | 0.249 | 0.368 | |
| 120 | 0.130 | 0.232 | 0.138 | 0.255 | |
| 180 | 0.063 | 0.134 | 0.069 | 0.150 | |
| 240 | 0.036 | 0.072 | 0.039 | 0.087 | |



Kuva 2.8 Taulukon 2.2 arvot esitetty kuvaajana

Taulukot 2.1 ja 2.2 sekä kuvaajat 2.7 ja 2.8 edustavat myös muita teräslajeja, joiden lämpötekniset ominaisuudet ovat vastaavat. Toisin sanoen muuttamalla teräslaji S355 muuhun tavanomaiseen rakenneteräkseen kuten esim. S460 tai S235 ei muuttaisi kuvaajaa. Taulukossa 2.3 on taulukoiden 2.1 ja 2.2 käytettyiden profiilien normaalilämpötilan taivutus- ja puristusjäykkyydet sekä niiden suhde liittopilariprofiiliin CHS 273x8,0, kun teräsprofiilin teräslaji on S355. Näitä taulukoita ja kuvia vertaamalla todetaan, että puristusjäykkyyden muutos riippuu huomattavasti profiilin normaalilämpötilan puristusjäykkyydestä ja hieman teräslajista. Tämä ilmenee parhaiten kuvasta 2.8, jossa kuvaajat etenevät selvästi pareina eli pienemmät profiilit CHS 273x8,0 ja SHS 250x250x8,0 sekä suuremmat CHS 406,4x12,5 ja SHS 400x400x12,5 ovat lähekkäin samoilla teräslajeilla. Taivutusjäykkyyden tapauksessa muutos riippuu enemmän käytetystä teräslajista kuin poikkileikkauksen alkuperäisestä taivutusjäykkyydestä. Se ilmenee kuvasta 2.7, jossa kuvaajat ovat ryhmittyneet lähekkäin teräslajien mukaan varsinkin pienillä paloajoilla.

Taulukko 2.3 Taulukoissa 2.1 ja 2.2 käytettyjen profiilien taivutus- ja puristusjäykkyydet normaalilämpötilassa ja niiden suhde profiiliin CHS 273x8,0 ja teräslajin S355 vastaaviin arvoihin.

| | CHS 273x8,0, 8T20, c=20 | CHS 406,4x12,5, 8T25, c=40 | SHS 250x250x8,0, 8T20, c=20 | SHS 400x400x12,5, 8T25, c=40 | |
|--------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------|
| EI [kNm ²] | 16229 | 78972 | 18143 | 114042 | S355 |
| | 16814 | 81975 | 18866 | 118629 | 1.4003 |
| | 15643 | 75969 | 17420 | 109454 | Duplex |
| EA [MN] | 3640 | 7686 | 3918 | 9509 | S355 |
| | 3706 | 8074 | 3994 | 9696 | 1.4003 |
| | 3573 | 7765 | 3843 | 9322 | Duplex |
| dEI S355 | 1,000 | 4,866 | 1,118 | 7,027 | S355 |
| CHS | 1,036 | 5,051 | 1,162 | 7,310 | 1.4003 |
| 273x 8,0 | 0,964 | 4,681 | 1,073 | 6,744 | Duplex |
| dEA S355 | 1,000 | 2,112 | 1,077 | 2,613 | S355 |
| CHS | 1,018 | 2,218 | 1,097 | 2,664 | 1.4003 |
| 273x8,0 | 0,982 | 2,133 | 1,056 | 2,561 | Duplex |

Varsin silmään pistävää on austeniittisen ja austeniittis-ferriittinen ruostumattoman teräksen ylivoimaisuus taivutus- ja puristusjäykkyyden säilyttämisessä. Näillä teräslajeilla pilarin taivutusjäykkyys pysyy tavallisen hiiliteräksen tasolla yli kaksinkertaisen palonkestojen. Vaatimattomimmin tässä vertailussa taivutusjäykkyytensä säilyttävä profiili on CHS 273x8,0, jonka taivutuskestävyydestä 60 minuutin palon kohdalla on jäljellä vain 15 %. Teräslajeilla 1.4301 ja 1.4462 taivutusjäykkyys laskee arvoon 0,15EI vasta 130 minuutin kohdalla ja ferriittisellä teräslajilla 1.4003 taivutusjäykkyys laskee arvoon 0,15EI 100 minuutin kohdalla. Vertailussa parhaiten menestyneellä profiililla SHS 400x400x12,5 on 60 minuutin palon kohdalla n. 20 % sen normaalilämpötilan taivutusjäykkyydestä. Teräslajeilla 1.4301 ja 1.4462 taivutuskestävyys laskee 20 % tasolle vasta 150 minuutin palon jälkeen ja teräslajilla 1.4003 taivutusjäykkyys laskee vastaavaan ti-

lanteeseen 110 minuutin kohdalla. Puristusjäykkyyttä tutkittaessa erot ovat samansuuntaiset, mutta eivät tosin niin merkittävän suuret. Jäykkyyksien säilyminen palossa ei tietenkään ole ainoa seikka, jolla pilarin ominaisuuksia mitataan, mutta edellisestä vertailusta voidaan päätellä, että ruostumattomalla teräksellä on potentiaalia liittopilarin teräsprofiilina.

Eräs liittopilaripoikkileikkauksen kestävyuden toteamismenetelmä on mitoittaa pilari keskeisesti puristettuna ja lisäämällä epäkeskisyydestä johtuvan pilarin pään momentti puristukuormaan ekvivalentilla kuormalla. Tähän perustuu Eurokoodin SFS-EN 1994-1-2 liitteen H yksinkertaistettu laskentamenetelmä betonilla täytetyillä putkiprofiileilla. Menetelmä soveltuu jokapäiväiseen käyttöön tai parametrisoitavaksi, vaikkakin sen soveltamisalue on rajoitettu: se soveltuu vain neliö- tai pyöreään poikkileikkaukseen ja nurjahduspituus rajoitetaan 4,5 m:iin. Varsinkin nurjahduspituuden rajoittaminen rajaa menetelmän käyttökohteita, sillä liittopilaria käytetään etenkin suurissa rakennuskomplekseissa kuten sairaaloissa ja liikekeskuksissa. Näissä rakennuskohteissa suositetaan avaria tiloja eli korkeita kerrosvälejä ja pitkiä jännevälejä, joihin 4,5 m nurjahduspituus ei todennäköisesti riitä. [12]

2.3 Nurjahduspituus

Nurjahduksella tarkoitetaan tässä yhteydessä pilarin tasonurjahdusta. Perustapauksessa sivusiirtymättömän monikerrospilarilla nurjahduspituus on kerrosvälin korkeus eli $L_{cr} = l,0L$. Eurokoodin osassa SFS-EN 1994-1-2 kohdassa 4.3.5.1 (10) esitetään palotilanteessa käytettävät nurjahduspituudet. Kohdan mukaan monikerrosliittopilarin keskikerroksien nurjahduspituuksina voidaan käyttää arvoa $L_{cr} = 0,5L$, joka vastaa sitä, että pilari olisi jäykästi tuettu sekä ala- että yläpäästä. Ehtoina tälle on, että monikerrospilari on jatkuva ylempään ja alempaan kerrokseen ja välipohja on oma palonkestävä osastonsa. Monikerrospilarin ylimmässä kerrosvälissä nurjahduspituutena voidaan käyttää arvoa $L_{cr} = 0,7L$, joka vastaa tilannetta, jossa pilari on alapäästä jäykästi kiinnitetty ja yläpäästä nivelellisesti. Monikerrospilarin alimman kerrosvälin tapauksessa SFS-EN 1994-1-2 ei anna suoraan lukuarvoa nurjahduspituudelle vaan sen vaihteluvälin, joka on $L_{cr} = 0,5L$ ja $L_{cr} = 0,7L$. [12]

Suunnittelussa yleisesti oletetaan pilarin toimivan ala- ja yläpäästä nivelen tavoin ja nurjahdusmuoto on puolet sinin aallonpituudesta. Todellisuudessa tämä on varmallalla puolella oleva yksinkertaistus ja nurjahduspituudet ovat pienemmät. Nurjahduspituuksia tutkitaan analyttisesti stabiilisuusteorian momenttimenetelmällä ja elementtimenetelmään perustuvilla tietokoneohjelmistoilla ANSYS ja RFEM. Molemmista ohjelmistoista tehdään yksinkertainen kuvan 2.1 mukainen kaksiulotteinen rakennemalli, jossa on nelikerroksinen pilari, jonka kerroskorkeus on 4,5 m. Pilarin profiilina on umpiteräksinen 100 mm * 100 mm suorakaide ja sen teräslaji on S355. Pilarin yläpäähän asetetaan kuorma 1 kN. Pilariväli jaetaan kahdeksaan elementtiin ja elementtien kokonaismäärä on 32 kappaletta. Pilari on tuettu alapäästä ideaalijäykästi ja kerrosväleiltä nivelellisesti. Pilarin liitokset

välipohjien ja yläpohjan kohdilla sallii pystysuuntaisen liikkeen, mutta ei sivusiirtymää. Ohjelmat laskevat nurjahduskuorman lineaarisella herkkyyysanalyysillä, jossa ohjelma käyttää staattisen epälineaarisen ratkaisun lopputilanteen jäykkyysmatriisia ja kasvattaa ratkaisun kuormitusta, kunnes nurjahdus tapahtuu.

Kuvan 2.1 monikerrospilarin, josta poistetaan välipohjiin ja yläpohjaan tulevat momentit sekä vaakakuormat ja lisätään pistekuorma P pilarin korkeuden suuntaisesti pisteeseen E, sauvanpääkiertymät voidaan kirjoittaa muodoissa

$$\varphi_{ij} = \alpha_{ij}M_{ij} - \alpha_{ij}M_{ji} + \theta_{ij} + \alpha_{ij}^0 \text{ ja} \quad (2.9)$$

$$\varphi_{ji} = \alpha_{ji}M_{ji} - \alpha_{ji}M_{ij} + \theta_{ji} + \alpha_{ji}^0,$$

missä α_{ij} on lyhennysmerkintä $\alpha_{ij} = \frac{L}{3EI} \frac{3}{kL} \left(\frac{1}{kL} - \frac{1}{\tan kL} \right) = \alpha_{ji}$,

M_{ij} sauvan päässä i oleva taivutusmomentti,

β_{ij} lyhennysmerkintä $\beta_{ij} = \frac{L}{6EI} \frac{6}{kL} \left(\frac{1}{\sin kL} - \frac{1}{kL} \right) = \beta_{ji}$,

M_{ji} sauvan päässä j oleva taivutusmomentti,

θ_{ij} sauvan päiden välinen kiertymä ja

α_{ij}^0 kuorman tai kuormituksien muodostamat kiertymät nivelpäisessä sauvassa.

Nelikerroksisen monikerrospilarin tapauksessa, jossa pilari on tuettu perustukseen jäykästi sekä välipohjiin ja yläpohjaan nivelellisesti, yhteensopivuusehdot ovat kuvan 2.1 merkinnöillä

$$\varphi_{AB} = 0, \varphi_{DE} = \varphi_{DC}, \varphi_{CD} = \varphi_{CB}, \varphi_{BC} = \varphi_{BA}, \quad (2.10)$$

$$M_{ED} = 0, M_{DE} = -M_{DC}, M_{CD} = -M_{CB} \text{ ja } M_{BC} = -M_{BA}.$$

Lisäksi sauvojen päiden väliset kiertymät θ_{ij} ja ulkoisesta kuormituksesta aiheutuva kiertymä α_{ij}^0 ovat nollia Yhdistämällä kaavat (2.9) ja (2.10) saadaan seitsemän yhtälön yhtälöryhmä, joissa tuntemattomia ovat sauvanpäämomentit.

$$\begin{bmatrix} -\alpha_{DE} & \alpha_{CD} & -\beta_{CD} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{CD} & -\alpha_{CD} & \alpha_{BC} & -\beta_{BC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_{BC} & -\alpha_{BC} & \alpha_{AB} & -\beta_{AB} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{AB} & -\alpha_{AB} \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{DE} \\ M_{DC} \\ M_{CD} \\ M_{CB} \\ M_{BC} \\ M_{BA} \\ M_{AB} \end{bmatrix} = [0] \quad (2.11)$$

Nurjahduskuormat löytyvät determinantin nollaehdosta ja merkitään sitä funktiolla $F(P)$:

$$F(P) = \begin{vmatrix} -\alpha_{DE} & \alpha_{CD} & -\beta_{CD} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{CD} & -\alpha_{CD} & \alpha_{BC} & -\beta_{BC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_{BC} & -\alpha_{BC} & \alpha_{AB} & -\beta_{AB} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{AB} & -\alpha_{AB} \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (2.12)$$

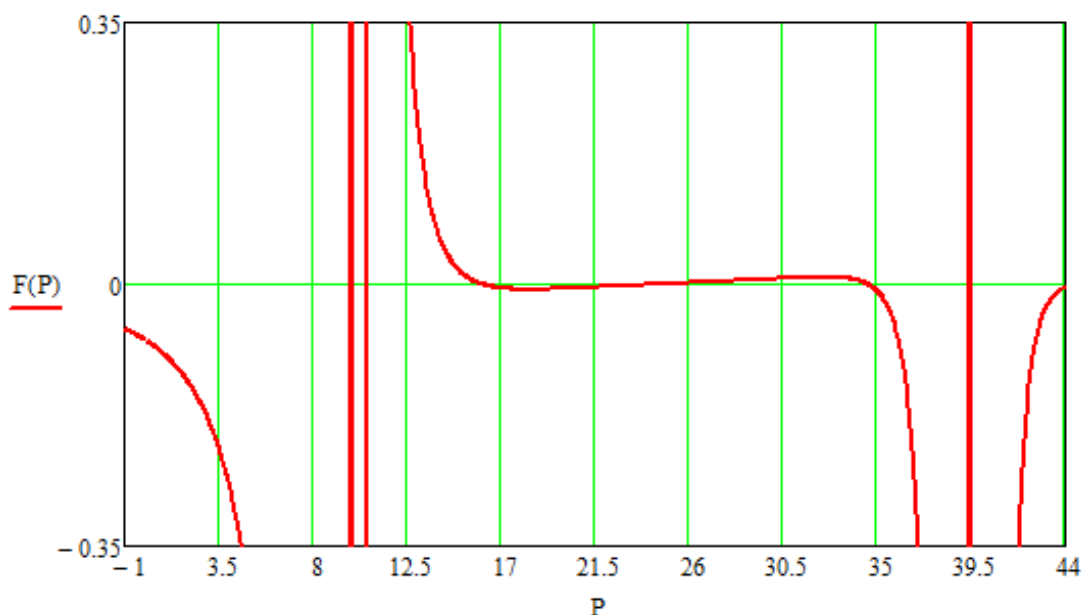
Muuttuja P on kriittinen kuorma, joka sisältyy lyhennemerkintään kL :

$$kL = \sqrt{\frac{P}{EI}} L. \quad (2.13)$$

Determinantin analyttinen muoto on liian pitkä kirjoitettavaksi tähän, mutta laskentaohjelmistot, kuten Mathcad, pystyvät käsittelemään funktiota.

Laskenta suoritetaan ensin siten, että monikerrospilari on tasajäykkä. Seuraavaksi suoritetaan laskenta yhden kerrosvälin ollessa palotilanteessa. Tätä jatketaan kaikille kerrosväleille järjestelmällisesti. Palotilannetta kuvaava analyysi suoritetaan olettaen palotilassa olevan pilarin taivutusjäykkyyden olevan 15 % normaalilämpötilan taivutusjäykkyydestä. Lisäksi laskenta tehdään vielä taivutusjäykkyyden ollessa 5 % alkuperäisesti. Merkitään pilarin taivutusjäykkyyttä palotilanteessa EI_{fi} .

Kuvassa 2.9 on esitetty funktion $F(P)$ kuvaaja normaalilämpötilassa. Ensimmäinen nollakohta löytyy kohdasta $P = 10.622$, joka vastaa nurjahduspituutta $0.964L$. Kyseessä on ylin (väli DE) kerrosväli, joka on myös helposti pääteltävissä. Toinen nollakohta on kohdassa $P = 16.082$, joka vastaa nurjahduspituutta $0.783L$. Nurjahtava pilari on BC. Seuraava nollakohta sijaitsee kohdassa $P = 24.786$ ja sen nurjahduspituus on $0.631L$ ja nurjahtava pilari on BC. Neljäs nollakohta on kohdassa $P = 34.543$ ja se vastaa nurjahduspituutta $0.535L$. Tapaukset lasketaan myös käyttämällä ANSYS- ja RFEM-ohjelmistoja ja niistä saadut tulokset ovat yllättävän lähellä käsin laskettuja. Standardin SFS-EN 1994-1-2 mukaan nurjahduspituutena voidaan käyttää pilareille kerrosväleillä DE, CD ja BC arvoa $1,0L$ ja välillä BA, joka on jäykästi kiinnitetty perustuksiin, arvoa $0,7L$. [12]



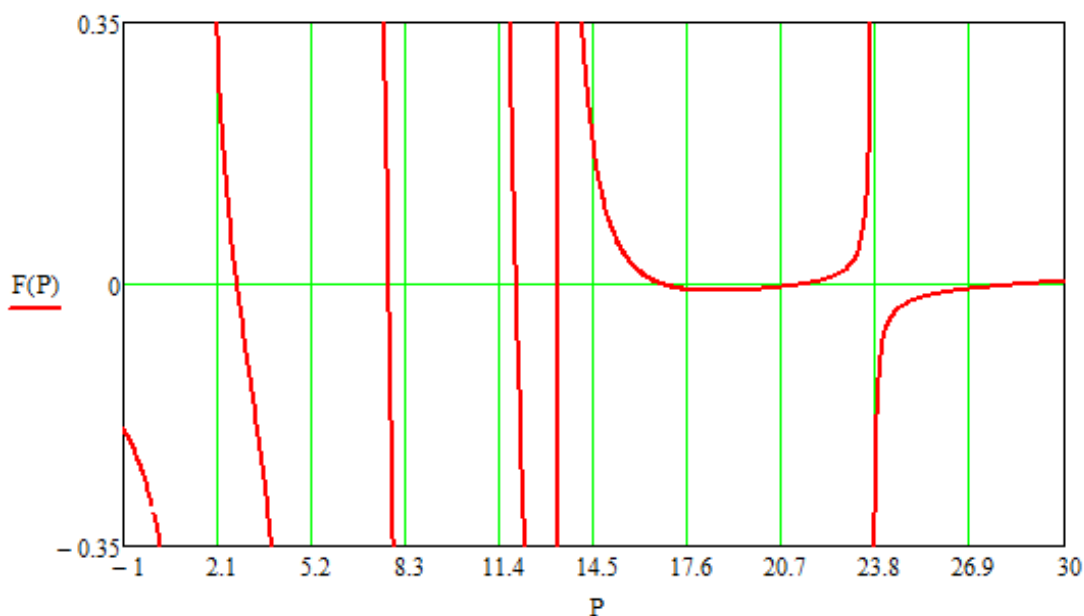
Kuva 2.9 Funktio $F(P)$ kuvaus, kun kyseessä on normaalilämpötila.

Kuvassa 2.10 on esitetty funktion $F(P)$ kuvaaja kerrosvälillä AB ollessa palotilanteessa ja taivutusjäykkyys on otaksuttu olevan 15 % alkuperäisestä. Standardin SFS-EN 1994-1-2 mukaan nurjahduspituutena voidaan käyttää ylimmässä sekä alimmassa kerroksessa arvoa $0,7L$ ja muissa kerroksissa $1,0L$. Ensimmäinen pilari, joka nurjahtaa on kerrosvälillä DE. Kuvassa 2.10 funktion ensimmäinen nollakohta löytyy arvosta $P = 2,759$, joka vastaa nurjahduspituutta $0,733L$. Toinen nollakohta $P = 7,757$ vastaa ylimmän kerroksen toista nurjahdusmuotoa. Seuraava nollakohta löytyy arvolla $P = 11,946$ ja nurjahtava pilari on kerrosvälillä CD. Vastaava nurjahduspituus on $0,909L$. Neljäs nurjahdusmuoto vastaa pilarivälillä BC nurjahdusta ja kriittisen kuorman arvo on $P = 16,739$ ja nurjahduspituus $0,768L$. Viidennessä nurjahdusmuodossa pilari CD nurjahtaa toisen kerran. Alin pilari AB nurjahdusmuoto on kuudennessa nollakohdassa kriittisellä kuormalla $P = 28,640$ ja se vastaa nurjahduspituutta $0,587L$. [12]

Normaalitapauksessa todelliset nurjahduspituudet ovat mitoitusnormiin verrattuna edellisen esimerkin tapauksessa ylhäältä alas 3,4 %, 36,9 %, 21,7 % ja 23,6 % pienemmät. Tämän tutkimuksen perusteella mitoitusnormit ovat selvästi varmalla puolella ja jatkuvan pilarin tapauksessa olisi perusteltua käyttää muualla kuin ylimmässä, eli esimerkin tapauksessa välillä DE, pienempiä nurjahduspituuksia tämän esimerkin perusteella. Käytännössä anturan ja pilarin liitos ei ole jäykkä ja joustaa sekä kiertyy jonkin verran. Suunnittelussa tämä otetaan huomioon pilarin kokonaiskiertymäjäykkyytenä tai joustolukuna. Lisäksi on tilanteita, joissa pilarin perustusliitoksen jäykkyyttä ei oteta huomioon suunnittelussa, vaan käytetään varmalla puolella olevia yksinkertaistuksia. Kirjallisuuden lähteiden [4][5] mukaan perustuksen joustolukuna voidaan käyttää arvoa $k = 0,35$.

Ennen Eurokoodia Suomen Rakennusmääräyskokoelmassa käytettiin korotettuja arvoja nurjahduspituuksille muissa kuin nivelpäisessä pilarissa, jonka sivusiirtymät oli estetty.

Aikaisemman normin mukaan edellisen esimerkin alimmassa kerroksessa olisi sen nurjahduspituutena käytettävä vähintään arvoa $0,8L$ nykyisen $0,7L$ sijasta. Korotettu arvo pohjautuu todennäköisesti siihen, että mitoitusnormin kirjoittajan tavoitteena oli saada aikaan yleispätevä ratkaisu ilman, että suunnittelijan pitäisi ratkaista liitosdetaljiikka ennen primääriprofiilien valintaa. Samaan ratkaisuun viittaa myös nivelpäisen sauvan nurjahduspituuden arvo $1,0L$, joka on varmalla puolella liitostyypistä riippumatta.



Kuva 2.10 Funktio $F(P)$ kuvaus, kun kerrosväli DE on palotilanteessa ja $EI_{fi} = 0,15EI$.

Taulukkoon 2.4 on koottu laskennallisten ja FEM-analyysin tuloksena saadut pilarin nurjahduspituuden arvot normaal- ja palotilanteessa. Merkintä EC tarkoittaa standardin SFS-EN 1994-1-2 esittämää nurjahduspituuden arvoa ja STAB käsin laskettuja tuloksia stabiilisuusteorian momenttimenetelmällä. Yksityiskohtaiset käsin laskelmat sekä ANSYS-tietokoneohjelmistolla saadut nurjahdusmuodot on esitetty liitteessä 2. [12]

Taulukossa 2.4 havaitaan, että laskennallisten tulosten ja elementtimenetelmällä saatujen tulosten välinen ero on todella pieni. Näin ainakin normaalilämpötilassa ja palotilanteen ollessa muissa kuin kerrosvälissä AB. Todetaan, että nämä tulokset vastaavat todellisuutta, koska sama tulos on saatu kolmesta lähes toisistaan riippumattomasta lähteestä. Ne ovat siis lähes toisistaan riippumattomia, koska stabiilisuusteorian momenttimenetelmällä ei saada nurjahdusmuotoja, joten nurjahdusmuotojen vastaavuus varmistetaan tietokoneohjelmistoista.

Palotilanteen ollessa kerrosvälillä AB ja taivutusjäykkyyden ollessa 5 % alkuperäisestä laskennalliset tulokset stabiilisuusteorialla eivät vastaa tietokoneohjelmistoista saatuja tuloksia täysin. Eroja yritettiin selvittää ja laskelmia tarkastaa, mutta loppujen lopuksi niiden syy jäi tuntemattomaksi. Virhe saattaa olla determinantin nollakohtien määrittämisessä,

joka osoittautui melko hankalaksi, vaikka käytössä olikin pitkälle kehittynyt laskentaohjelmisto. Nollakohdan löytämiseksi on asetettava sivistynyt arvaus, ja Mathcad etsi nollakohtaa Newtonin-Raphsonin menetelmällä, joka johtuen kuvauksen epäjatkuvaasta luonteesta ei tuottanut aina tulosta. Alkuarvauksia tehtiin nollan ja 20 välillä 0,1 välein. Myöskään kuvaajan piirtäminen ei ollut helppoa sillä tietokoneohjelmisto saattoi piirtää kuuvajan, osan siitä tai ei mitään riippuen käytettävien akselien mittasuhteiden valinnasta. On mahdollista, että todellisuudessa kuvaajalla olisi ollut vielä yksi tai enemmän nollakohtia, joita arvaukset eivät löytäneet eli taulukossa 2.4 olevat nurjahduspituudet vastaavat oikeaa järjestystä, mutta asteikolla järjestysluvultaan yhden tai enemmän suurempaa nurjahdusmuotoa. Tietokoneohjelmistojen tulokset vastaavat hyvin toisiaan ja hypoteesia, joten käsitellään niitä kuin ne olisivat esimerkkitilanteiden todelliset nurjahduspituudet.

Kuvan 2.10 tilanteessa nurjahduspituudet ovat suuremmat kuin mitoitusnormien ohjeistamat. Ylimmän kerroksen tapauksessa saadaan nurjahduspituuksiksi käsin stabiilisuusteorialla ja elementtimenetelmällä ANSYS- ja RFEM-tietokoneohjelmistoilla arvot $0,733L$, $0,735L$ ja $0,733L$ luettelemisjärjestyksessä. Nurjahduspituudet ovat hieman epävarmalla puolella. Taivutusjäykkyyden suhteella $EI_{fi} = 0,05EI$ nurjahduspituudet ovat $0,710L$, $0,715L$ ja $0,711L$ samassa järjestyksessä. Tästä päätellään, että taivutusjäykkyyden suhteen lähestyessä nollaa nurjahduspituus lähestyy arvoa $0,7L$.

Kohdassa 2.2 tutkittiin muun muassa liittopilarin taivutusjäykkyyden pienenemistä palotilanteessa ja sen tuloksista päätellään, että nurjahduspituuden $0,7L$ käyttäminen on liian optimistista. Valtaosa palomitoituksista tehdään paloluokkaan R60 ja alkuperäisestä taivutusjäykkyydestä on jäljellä enemmän, kuin edellisestä voisi päätellä. Edes pitkillä palonkestoajoilla, kuten R180 tai R240 taivutusjäykkyys ei laske mainittavasti alle 5% alkuperäisestä tavanomaisilla profiileilla. Samankaltaista ylioptimistisuutta standardin SFS-EN 1994-1-2 mukaisissa palotilanteiden nurjahduspituuksissa on huomattavissa myös muiden pilareiden tapauksissa. Taulukossa 2.4 on korostettu ne tilanteet, jotka suunnittelun näkökulmasta tuottaisivat optimistisia laskentatuloksia. Tämän tutkimuksen perusteella liittopilareiden nurjahduspituuksina palotilanteessa olisi suositeltavaa käyttää arvoja $0,8L$ ja $0,6L$. [12]

Taulukko 2.4 Pilarin nurjahduspituudet normaali- ja palotilanteissa kerroskohtaisesti. Korostetut arvot tuottavat suunnittelun kannalta epävarmalla puolella olevan lopputuloksen.

| | kr | EC | STAB | ANSYS | RFEM |
|--|----|-----------|--------------|--------------|--------------|
| Tilanne normaalilämpötilassa | 4 | 1 | 0,964 | 0,967 | 0,965 |
| | 3 | 1 | 0,631 | 0,632 | 0,632 |
| | 2 | 1 | 0,783 | 0,785 | 0,784 |
| | 1 | 0,7 | 0,535 | 0,535 | 0,536 |
| DE kerros palotilanteessa $EI_{fi}=0.15EI$ | 4 | 0,7 | 0,733 | 0,735 | 0,733 |
| | 3 | 1 | 0,909 | 0,912 | 0,911 |
| | 2 | 1 | 0,768 | 0,771 | 0,772 |
| | 1 | 0,7 | 0,587 | 0,591 | 0,592 |
| DE kerros palotilanteessa $EI_{fi}=0.05EI$ | 4 | 0,7 | 0,71 | 0,715 | 0,711 |
| | 3 | 1 | 0,921 | 0,927 | 0,927 |
| | 2 | 1 | 0,816 | 0,824 | 0,829 |
| | 1 | 0,7 | 0,551 | 0,557 | 0,562 |
| CD kerros palotilanteessa $EI_{fi}=0.15EI$ | 4 | 1 | 1,075 | 1,078 | 1,078 |
| | 3 | 0,5 | 0,565 | 0,566 | 0,566 |
| | 2 | 1 | 0,804 | 0,806 | 0,806 |
| | 1 | 0,7 | 0,583 | 0,586 | 0,587 |
| CD kerros palotilanteessa $EI_{fi}=0.05EI$ | 4 | 1 | 1,017 | 1,023 | 1,025 |
| | 3 | 0,5 | 0,517 | 0,519 | 0,519 |
| | 2 | 1 | 0,842 | 0,847 | 0,849 |
| | 1 | 0,7 | 0,587 | 0,594 | 0,599 |
| BC kerros palotilanteessa $EI_{fi}=0.15EI$ | 4 | 1 | 0,92 | 0,922 | 0,922 |
| | 3 | 1 | 1,047 | 1,051 | 1,05 |
| | 2 | 0,5 | 0,552 | 0,553 | 0,554 |
| | 1 | 0,7 | 0,607 | 0,609 | 0,611 |
| BC kerros palotilanteessa $EI_{fi}=0.05EI$ | 4 | 1 | 0,918 | 0,925 | 0,928 |
| | 3 | 1 | 1,007 | 1,012 | 1,012 |
| | 2 | 0,5 | 0,515 | 0,516 | 0,516 |
| | 1 | 0,7 | 0,785 | 0,793 | 0,798 |
| AB kerros palotilanteessa $EI_{fi}=0.15EI$ | 4 | 1 | 0,923 | 0,925 | 0,926 |
| | 3 | 1 | 0,599 | 0,601 | 0,602 |
| | 2 | 1 | 1,017 | 1,02 | 1,019 |
| | 1 | 0,5 - 0,7 | 0,53 | 0,531 | 0,532 |
| AB kerros palotilanteessa $EI_{fi}=0.05EI$ | 4 | 1 | 0,815 | 0,924 | 0,929 |
| | 3 | 1 | 0,607 | 0,661 | 0,668 |
| | 2 | 1 | 0,918 | 1,004 | 1,004 |
| | 1 | 0,5 - 0,7 | 0,508 | 0,509 | 0,509 |

3. SUUNNITTELUPERUSTEET

3.1 Materiaalit

Teräslaji S355 on tavanomainen rakenneteräs, joka tunnettiin aiemmin nimellä Fe52. Sen myötöraja on 355 MPa ja murtoraja 520 MPa. Sen hiilipitoisuus on yleensä alle 0,8 %. Teräslaji S355 on tunnetuin ja käytetyin rakenneteräslaji Suomessa ja tässä työssä sitä käytetään yleisesti hiiliteräslajien edustajana. [8]

Ruostumattomat teräkset ovat rautaseoksia, jotka sisältävät kromia yli 10 %. Esimerkiksi teräslaji 1.4003 on ferriittinen ruostumaton teräs, jonka myötöraja on 280 MPa ja murtoraja 450 MPa alle 12 mm ainevahvuuksilla. Se sisältää noin 11 % kromia ja vain alle 1 % nikkeliä, joka tekee siitä edullisimman ferriittisen ruostumattoman teräksen. Lisäksi pienen nikkelipitoisuuden ansioista sen hintataso on melko vakaa maailmanmarkkinoilla. Sitä käytetään tässä työssä edustamaan yleisesti ferriittisiä ruostumattomia teräslajeja. [9]

Teräslaji 1.4301 on yleisin austeniittinen ruostumaton teräs, jonka myötöraja on 210 MPa ja murtoraja 520 MPa alle 12 mm ainevahvuuksilla. Se sisältää 17,5 - 20 % kromia ja 8 - 11 % nikkeliä. Teräslaji 1.4462 on austeniittis-ferriittinen ruostumaton teräs ja se tunnetaan paremmin tuotenimellä Duplex. Sen myötölujuus on 460 MPa ja murtolujuus 660 MPa alle 12 mm ainevahvuuksilla. Se sisältää 21 - 23 % kromia, 4,5 - 6,5 % nikkeliä, 2,5 - 3,5 % molybdeeniä sekä 0,1 - 0,22 % typpeä. Edellä mainitut teräslajit 1.4301 ja 1.4462 edustavat tässä työssä yleisesti austeniittista ja austeniittis-ferriittistä ruostumatonta terästä. Tässä työssä käsitellään edellä mainittuja kolmea ruostumatonta teräslajia. Erilaisen mikrorakenteen pohjalta ruostumattomat teräkset voidaan jakaa vielä martensiittisiin teräksiin. Niiden lujuus on erittäin korkea, mutta ne ovat hauraita ja hankalasti muovattavia ja ne eivät sovellu hyvin rakentamiseen. [9][10]

Betonin lujuusmerkintä C40/50 tarkoittaa, että betonin lieriöpuristuslujuus 28 vuorokauden ikäisinä on 40 MPa ja kuutiopuristuslujuus saman ikäisenä 50 MPa. Tavallisempaa raudoitusteräksenä käytetään betoniteräslaadua B500B, jota voidaan pitää täysin korvaavana tuotteena ennen käytetylle betoniteräslaadulle A500HW [11], jota näkee edelleen käytettävän. Raudoitustuotteet ovat molemmat kuumavalssattuja ja hitsattavia, joka saat-
taa aiheuttaa sekaannusta, koska vanhaan aikaan ensimmäisen kirjaimen ollessa A oli kyseessä kuumavalssattu ja sen ollessa B kylmävalssattu. Nimeämisuutokset johtuvat siitä, että betoniraudotteille haetaan tyyppihyväksyntää. Tuotehyväksynnän mukaan kaikki raudoitusteräkset alkavat kirjaimella B, jonka jälkeen myötölujuus yksikössä N / mm². Numeroarvon jälkeen on kirjain A, B tai C, jotka ilmoittavat teräksen sitkeysluokan ja niiden jälkeen mahdolliset lisätunnukset. Kyseinen tyyppihyväksyntä on kansallinen ja etukirjain B edustaa suomenkielistä sanaa ”betoniteräs”.

Rakenneteräksen lujuus on esitetty sen nimessä samalla tavalla kuin raudoitusteräksellä. Etukirjain tunnuksessa S355J0 on englannin kielinen sana rakenneteräkselle (*structural*) ja sen jälkeinen numero on myötölujuus yksikössä N / mm². Viimeisenä mahdolliset lisätunnukset, jotka kuvaavat mm. teräksen iskusitkeyttä, transitiolämpötilasta riippuvaa laatuluokkaa tai tiivistämistapaa.

Betonin, raudoitusteräksen ja rakenneteräksen merkinnöistä materiaalin lujuus ilmenee suoraan. Ruostumattomien teräksien merkintä on erityyppinen ja ilmaisee ruostumattoman teräksen ryhmää. Esimerkiksi teräsnumero 1.4003 voidaan jakaa kolmeen osaan. Ensimmäinen on 1. (yksi ja piste), joka edustaa terästä. Toisena on kaksinumeroinen sarja, tässä tapauksessa 40, joka kertoo mihin alaryhmään kyseinen teräsluokka kuuluu. Viimeiset kaksi numeroa yksittäisen teräslajin tunniste, tässä tapauksessa 03. Lisäksi jokaisella ruostumattomalla teräksellä on myös nimi, joka koostuu neljästä osasta. Teräsnumeron 1.4003 nimi on X2CrNi12 ja se jaetaan osiin seuraavasti: X, 2, CrNi ja 12. Tunnus X ilmaisee, että kyseessä on korkeasti seostettu teräs. Järjestyksessä toinen numero on lisätyn hiilen määrä yksikössä kertaa 100 % eli tässä tapauksessa 200 %. Kolmantena on tärkeimpien seosaineiden kemialliset merkit ja viimeisenä niiden prosentuaalinen osuus. [9]

Esimerkiksi 1.40- alkuiset teräsnumerot sisältävät alle 2,5 % nikkeliä, eivät sisällä molybdeenia ja sisältävät erityisiä seosaineita. Ruostumattomien teräksien ryhmittelyt ovat karkeasti seuraavat [9]:

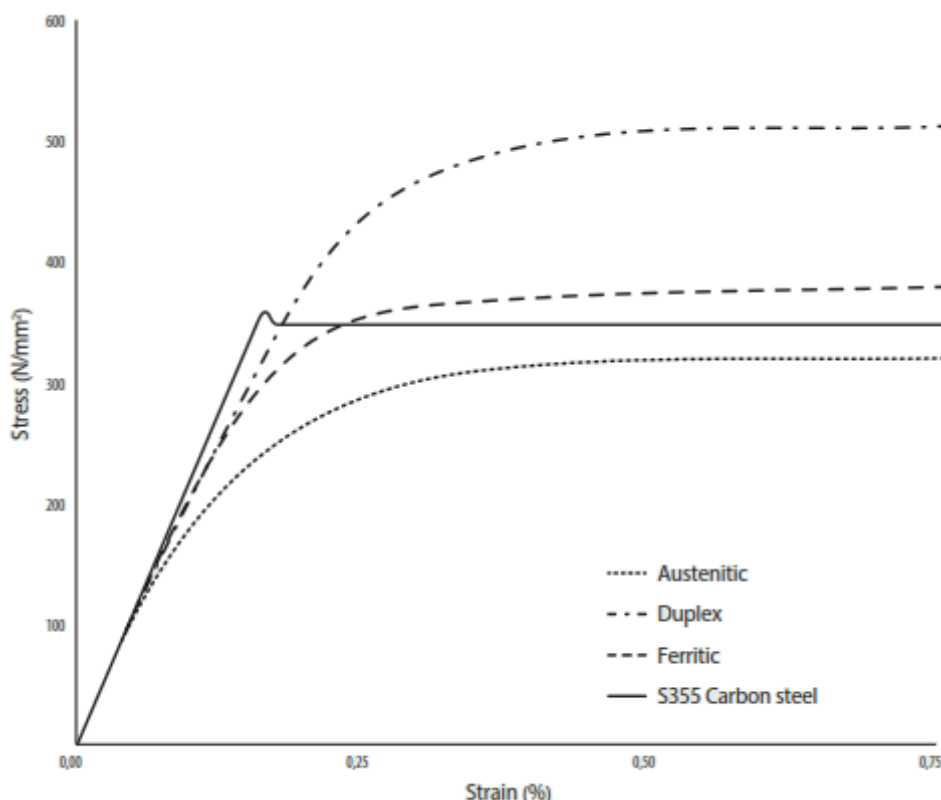
| | |
|--------|--|
| 1.40xx | Ni < 2,5 % ilman Mo, Nb tai Ti |
| 1.41xx | Ni < 2,5 % sisältää Mo, mutta ilman Nb tai Ti |
| 1.43xx | Ni > 2,5 % ilman Mo, Nb tai Ti |
| 1.44xx | Ni > 2,5 % sisältää Mo, mutta ilman Nb tai Ti |
| 1.45xx | Lisätty erityisiä seosaineita kuten Nb, Ti ja Cu |
| 1.46xx | Lisätty erityisiä seosaineita kuten Nb, Ti ja Cu |

3.2 Mekaaniset materiaaliominaisuudet

Tässä työssä tutkittavat liittopilariprofiilit koostuvat rakenneteräsputkesta, joka on täytetty raudoitetulla tai raudoittamattomalla betonilla. Standardit SFS-EN 1994-1-1 ja SFS-EN 1994-1-2 määräävät melko rajatun alueen sille, mitä materiaaliluokkia suunnittelijalla on käytössä. Tavallisen betonin lujuus rajoitetaan betoniluokkien C20/25 ja C60/75 välille ja kevytbetonin luokkien LC20/22 ja LC60/66 välille. SFS-EN 1994-1-2 viittaa muiden betonin ja raudoitusteräksen mekaanisten ominaisuuksien olevan standardin SFS-EN 1992-1-1 mukaisia normaalilämpötilassa 20 °C. Raudoitusteräksen lujuusluokan tulee olla 400 ja 600 MPa välillä ja kansallinen liite on laajentanut ylärajaa 700 MPa:han. Epävarmaa on, että myöntääkö kansallinen liite suuremman lujuuden betoniraudoitukselle myös liittopilareissa käytettävälle betoniteräkselle. Betonin maksimipuristuma on näillä betoniluokilla $\epsilon_{cu} = 3,5$ ‰. Suuremmilla betoniluokilla maksimipuristuma on pienempi ja

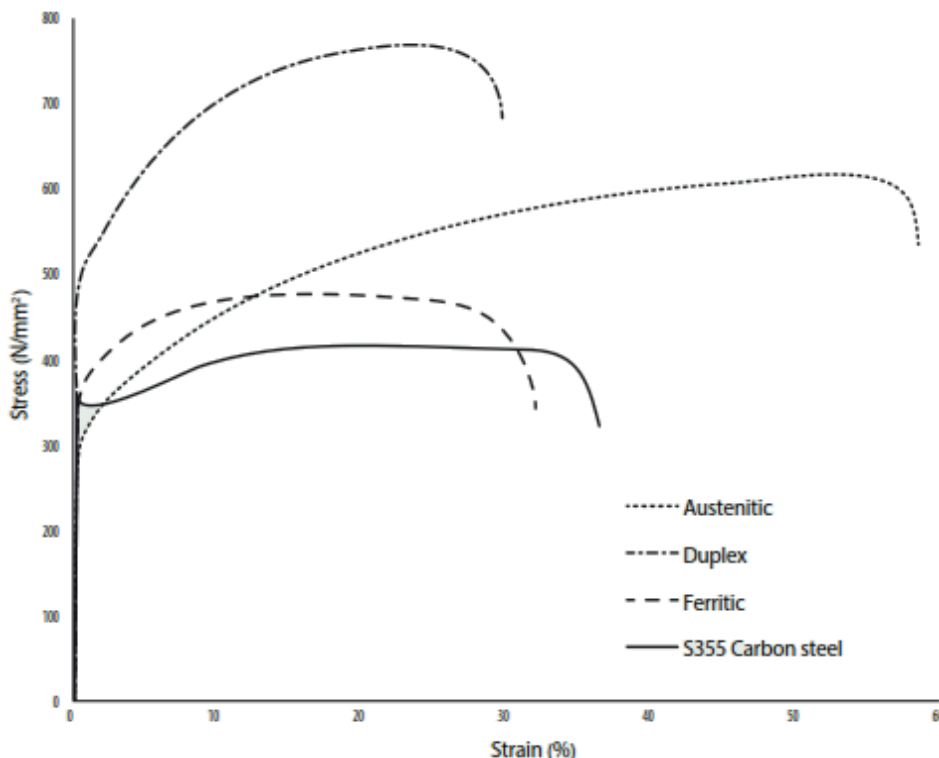
se muuttaa betonin käyttäytymistä epälineaarisemmaksi. Korkealujuusbetonin käyttöä liittopilarissa on tutkittu toistaiseksi vähän ja tästä syystä yli C60/75 betoniluokkien käyttö on suljettu pois standardista SFS-EN 1994-1-1. Vähäisten tutkimusten[13][14] perusteella korkealujuusbetonin käyttö kasvattaa liittopilarin kestävyyttä merkittävästi, mutta muuttaa myös niiden murtumistavan räjähdysmäisen hauraaksi. Tähän perustuu Eurokoodin rajoitus lujusluokalle, sillä lähtökohtaisesti rakenteen murtotavan on oltava aina sitkeä. Syy alarajan asettamiselle on tuntematon. Kevytbetoni rajataan tämän työn ulkopuolelle. [3][12][22]

Hiiliteräksen osalta SFS-EN 1994-1-2 viittaa mekaanisten ominaisuuksien normaalilämpötilassa olevan SFS-EN 1993-1-1 mukaisia. Lisäksi SFS-EN 1994-1-1 kohdassa 3.3 on maininta, että teräksen suurin nimellinen myötölujuus on oltava enintään 460 MPa. Ruostumattomiin teräksiin SFS-EN 1994-1-2 ei ota kantaa, mutta niiden mekaaniset ominaisuudet ovat standardista SFS-EN 1993-1-4 ja niitä käytetään tässä työssä. Ainoastaan austeniittis-ferriittinen teräslaji 1.4462 nimellinen myötölujuus on suurempi kuin rajattu 460 MPa (480 MPa) 6 mm tai sitä pienemmillä ainevahvuuksilla ja tässä työssä käytetään teräslajin 1.4462 lujutena 12 mm ja pienemmillä ainevahvuuksilla 460 MPa. Teräslaatujen jännitys-venymä kuvaaja on esitetty kuvassa 3.1, kun venymä on nollan ja 0,75 % välillä ja kuvassa 3.2 suuremmilla venymillä. [3][10][12][23]



Kuva 3.1 Eri teräslaatujen jännitys-venymä kuvaajat, kun venymä on välillä 0...0.75 % [9]

Kuvasta 3.1 näkee, että toisin kuin hiiliteräksellä, ruostumattomilla teräkselle ei ole selvää myötörajaa, jota ennen se käyttäytyy täysin lineaarisesti. Tästä syystä ruostumattomien teräksien myötörajana käytetään 0,2 -rajaa. Se on vetojännitys, jolla teräkseen syntyy 0,2 % suuruinen plastinen venymä.



Kuva 3.2 Eri teräslaatuojen jännitys-venymä kuvaajat, kun venymä on välillä 0...60 % [9]

Taulukossa 3.1 on esitetty betonin ja käytettävien teräslaatuojen tämän työn kannalta oleelliset mekaaniset ominaisuudet. Betonilla kimmokerroin on riippuvainen betonin lujuudesta. Betonin kimmokertoimen kaavassa muuttuja f_{cm} on betonin keskimääräinen puristuslujuus 28 vuorokauden ikäseinä, jonka suuruus riippuu betoniluokasta. Teräsmateriaaleilla kimmokerroin on vakio normaalilämpötilassa. Lisäksi betonin ja teräsmateriaalien tiheys oletetaan vakioksi lämpötilasta riippumatta. Ne toki riippuvat lämpötilasta, mutta niiden vaikutus on vähäinen. Hiiliteräksen tiheys on $7850 \text{ kg} / \text{m}^3$ ja betonin tiheytenä käytetään $2300 \text{ kg} / \text{m}^3$. Austeniittisillä teräksillä tiheys on hieman hiiliterästä suurempi $7900...8000 \text{ kg} / \text{m}^3$ ja ferriittisillä sekä Duplex – teräksillä hieman pienempi $7700...7800 \text{ kg} / \text{m}^3$. [9]

Ruostumattomien teräksien myötö- ja murtolujuudet normaalilämpötilassa on esitetty taulukossa 3.2 eri ainevahvuuksille. Tässä on huomautettava, että taulukossa on ruostumattomien teräksien lujuuksien minimiarvot ja todellisuudessa ne ovat suurempia ainakin pienillä ainevahvuuksilla. Lähteen [9] mukaan alle 25 mm ainevahvuuksilla austeniittisten teräksien todellinen myötölujuus on n. 25...40 % suurempi. Duplex -teräksillä vas-

taava vaihteluväli on pienempi arviolta n. 5...20 %. Lisäksi lähde [9] kirjoittaa, että myötölujuuden ja ainevahvuuden suhde on kääntäen verrannollinen eli suuremmilla ainevahvuuksilla, tässä tapauksessa yli 25 mm levyillä, myötöraja on jo melko lähellä ilmoitettua arvoa.

Taulukko 3.1 Betonin, betoniraudoituksen ja rakenneteräksen kimmoiset ominaisuudet Eurokoodistandardien SFS-EN 1992-1-1, SFS-EN 1993-1-1, SFS-EN 1993-1-4 ja lähteen [9] mukaan. [10][22][23]

| | E [GPa] | ν [-] |
|--|------------------------------|-----------|
| Betoni | $22 \cdot (f_{cm}/10)^{0,3}$ | 0,2 |
| S235 / S275 / S355 / S420 / S460 | 210 | 0,3 |
| Betonirauditus / 1.4301 / 1.4306 / 1.4307 / 1.4311 / 1.4318 / 1.4362 / 1.4401 / 1.4404 / 1.4406 / 1.4432 / 1.4435 / 1.4439 / 1.4462 / 1.4512 / 1.4541 / 1.4571 | 200 | |
| 1.4003 / 1.4016 | 220 | |
| 1.4529 / 1.4539 / 1.4547 | 195 | |

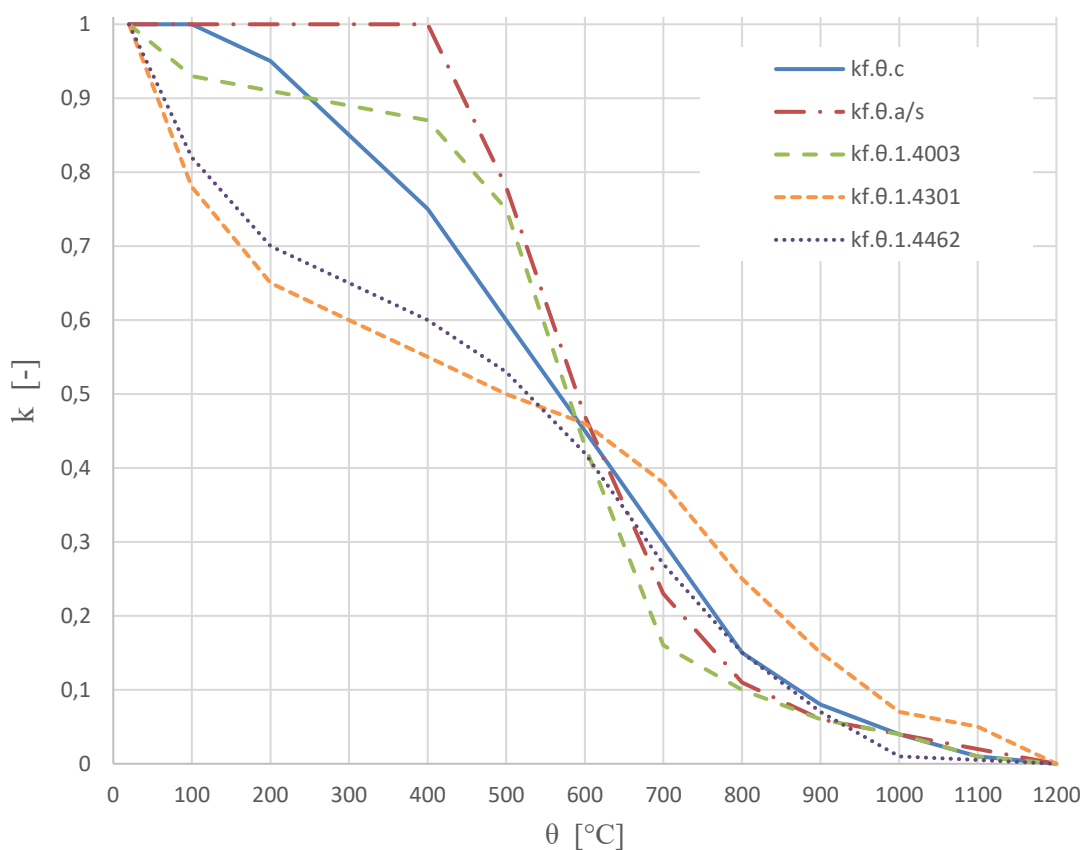
Palotilanteessa betonin ja teräsmateriaalien myötölujuudet ja kimmokertoimet laskevat. Kuvissa 3.3 ja 3.4 sekä taulukoissa 3.3 ja 3.4 on esitetty betonin, rakenne- ja betoniteräksen sekä ruostumattomien teräslajien 1.4003, 1.4301 ja 1.4462 tämän työn kannalta oleelliset lämpötilasta riippuvat mekaanisten ominaisuuksien pienennyskertoimet. Rakenneteräsputkella ja betoniteräksellä edellä mainitut kertoimet ovat samat. Alaindeksi f kuvaa lujuutta, E kimmokerrointa ja θ lämpötilaa. Lukuarvot on esitetty standardeissa SFS-EN 1994-1-2 ja SFS-EN 1993-1-4. [12][10]

Eurokoodistandardin SFS-EN 1994-1-2 mukaan rakenneteräksen lujuus alkaa laskea, kun lämpötila nousee yli 400 °C. Sen jälkeen lujuus laskee jyrkästi ja 800 °C kohdalla rakenneteräksen lujuus on enää vain 10 % sen alkuperäisestä lujuudesta. Rakenneteräksen lämpötilan ollessa yli 800 °C sen rooli liittopilarin rakenteellisessa toiminnassa on pieni. Tosin betonivalun sisällä olevien betoniterästen lämpötila on lähes betonin lämpötilaa vastaava ja niiden rooli on merkittävä kantokyvyn kannalta. Betonilla lujuus alkaa laskea 100 °C jälkeen, ensin loivasti, mutta pian jyrkemmin, mutta ei kuitenkaan niin jyrkästi kuin hiiliteräksen lujuus. [12]

Eurokoodistandardin SFS-EN 1993-1-2 ja lähteen [9] mukaan ruostumattomien teräksien lujuus alkaa laskea heti, kun lämpötila nousee huoneenlämmön yläpuolelle. Austeniittisellä ja austeniittis-ferriittisellä ruostumattomilla teräksillä lujuus laskee nopeasti ja verrattuna hiiliteräkseen niiden lujuus on enää 55...60 % alkuperäisestä, kun hiiliteräs on vielä täydessä lujuudessa. Lasku on tosin hitaampaa ja ne saavuttavatkin hiiliteräksen lujuuden n. 600 °C kohdalla, joka voidaan nähdä myös kuvasta 3.3 ja taulukosta 3.3. Ferriittinen ruostumaton teräs säilyttää lujuutensa pidempään ja 400 °C kohdalla sen lujuus

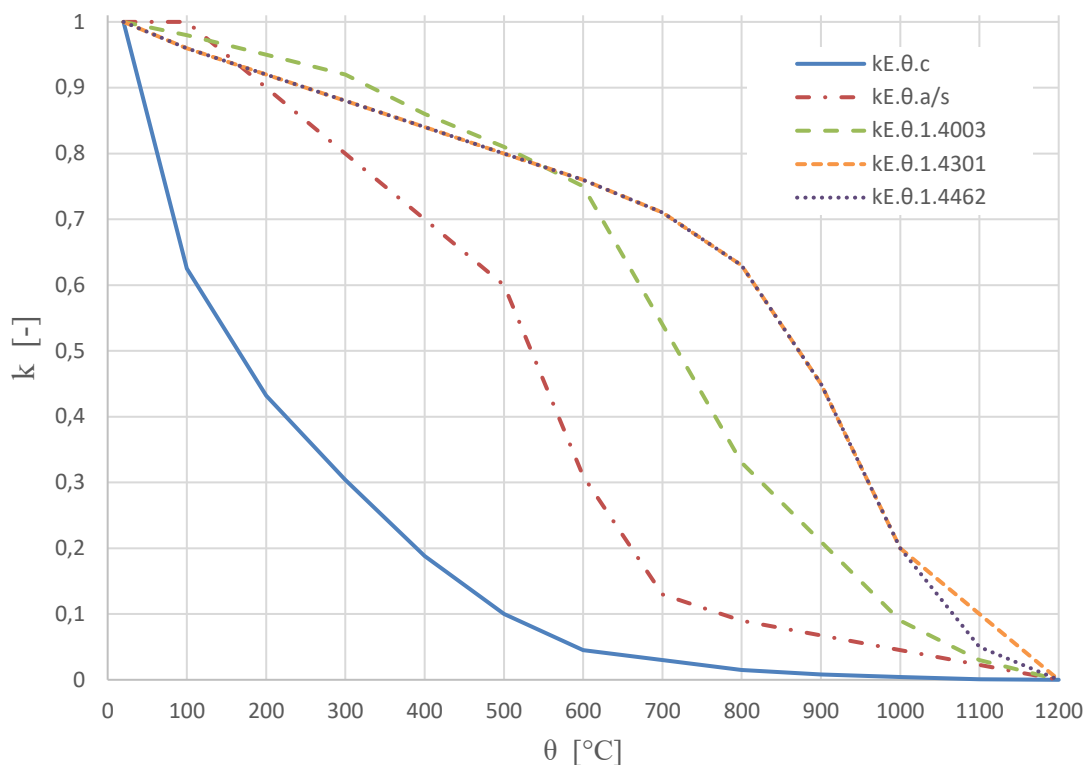
on vielä n. 85 % alkuperäisestä, mutta sen jälkeen sen lujuus alkaa laskea yhtä jyrkästi kuin hiiliteräksellä. On myös huomattava, että kaikkien materiaalien lujuuden pienennyskerroin on näennäinen leikkauspiste n. 600 °C kohdalla, jonka kohdalla pienennyskerroin on 0,4 ja 0,45 välillä. Tämän jälkeen erot ovat kohtalaisen pieniä. Ainoastaan austeniittisen teräksen lujuuden pienennyskerroin on selvästi muita suurempi välillä 600...1200 °C. [19]

Ruostumattomalla teräksellä saattaa tulla vastaan harvinaislaatuinen tilanne, jossa sen lujuutta on laskettava myös normaalilämpötilassa kuumenemisin myötä. Tämä aiheutuu, mikäli aurinko pääsee paistamaan ja lämmittämään terästä. Sen lämpötila voi pitkänä lämpimänä päivänä nousta jopa yli 50 °C. Teräslajilla 1.4003 se tarkoittaa lujuuden pienentämistä 5 % ja teräslajeilla 1.4301 sekä 1.4462 10% standardin SFS-EN 1993-1-2 mukaan. [19]



Kuva 3.3 Betonin ja käytettävien teräsmateriaalien lujuuksien pienennyskerroimet eri lämpötiloilla standardien SFS-EN 1994-1-2, SFS-EN 1993-1-2 ja lähteen [9] mukaan. [12][19]

Teräksien väliset erot kimmomoduulin arvon muutoksessa ovat selvemmin havaittavissa kuin lujuuden pieneminen. Kuvasta 3.4 ja taulukosta 3.4 huomataan, että ruostumattomat teräsprofiilit säilyttävät jäykkyytensä paremmin kuin hiiliteräsprofiilit, pois lukien aivan palon alkutilanteen. Asiaa tutkittiin esimerkkien avulla kohdassa 2.2.



Kuva 3.4 Betonin ja käytettävien teräsmateriaalien kimmokertoimien pienennyskertoimet eri lämpötiloilla standardien SFS-EN 1994-1-2, SFS-EN 1993-1-2 ja lähteen [9] mukaan. [12][19]

Taulukko 3.3 Betonin ja käytettävien teräsmateriaalien lujuuksien pienennyskertoimet eri lämpötiloilla standardien SFS-EN 1994-1-2, SFS-EN 1993-1-2 ja lähteen [9] mukaan. [12][19]

| θ | Betoni | S355 / B500B | 1,4003 | 1,4301 | 1,4462 |
|----------|--------|--------------|--------|--------|--------|
| 20 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 100 | 1 | 1 | 0,93 | 0,78 | 0,82 |
| 200 | 0,95 | 1 | 0,91 | 0,65 | 0,7 |
| 300 | 0,85 | 1 | 0,89 | 0,6 | 0,65 |
| 400 | 0,75 | 1 | 0,87 | 0,55 | 0,6 |
| 500 | 0,6 | 0,78 | 0,75 | 0,5 | 0,53 |
| 600 | 0,45 | 0,47 | 0,43 | 0,46 | 0,42 |
| 700 | 0,3 | 0,23 | 0,16 | 0,38 | 0,27 |
| 800 | 0,15 | 0,11 | 0,1 | 0,25 | 0,15 |
| 900 | 0,08 | 0,06 | 0,06 | 0,15 | 0,07 |
| 1000 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,01 |
| 1100 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,05 | 0,005 |
| 1200 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Taulukko 3.4 Betonin ja käytettävien teräsmateriaalien kimmokertoimien pienennyskertoimet eri lämpötiloilla standardien SFS-EN 1994-1-2, SFS-EN 1993-1-2 ja lähteen [9] mukaan. [12][19]

| θ | Betoni | S355 / B500B | 1,4003 | 1,4301 | 1,4462 |
|----------|--------|--------------|--------|--------|--------|
| 20 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 100 | 0,625 | 1 | 0,98 | 0,96 | 0,96 |
| 200 | 0,432 | 0,9 | 0,95 | 0,92 | 0,92 |
| 300 | 0,304 | 0,8 | 0,92 | 0,88 | 0,88 |
| 400 | 0,188 | 0,7 | 0,86 | 0,84 | 0,84 |
| 500 | 0,1 | 0,6 | 0,81 | 0,8 | 0,8 |
| 600 | 0,045 | 0,31 | 0,75 | 0,76 | 0,76 |
| 700 | 0,03 | 0,13 | 0,54 | 0,71 | 0,71 |
| 800 | 0,015 | 0,09 | 0,33 | 0,63 | 0,63 |
| 900 | 0,008 | 0,0675 | 0,21 | 0,45 | 0,45 |
| 1000 | 0,004 | 0,045 | 0,09 | 0,2 | 0,2 |
| 1100 | 0,001 | 0,0225 | 0,03 | 0,1 | 0,05 |
| 1200 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

3.3 Termiset materiaaliominaisuudet

Tässä tutkimuksessa teräksen ja betonin tärkeimmät termiset materiaaliominaisuudet ovat ominaislämpökapasiteetti c , lämmönjohtavuus λ ja lämpöpitenevä ΔL . Yhtälöissä (3.1) ... (3.4) on esitetty hiili-, betonirauditus-, austeniittis-ferriittisen, ferriittisen teräksen ja betonin ominaislämpökapasiteetit lämpötilan funktiona ja ne ovat esitetty alaindeksien a, dup, fer ja c avulla samassa järjestyksessä. Austeniittis-ferriittisellä ruostumattomalla teräksellä (Duplex) ja austeniittisellä teräkselle käytetään samoja yhtälöitä termisille materiaaliominaisuuksille. Samoin myös liittopilarin ulkokuorena olevalle hiili- sekä raudoitusteräkselle käytetään samoja termisiä materiaaliominaisuuksia. Yhtälöistä saatu numeraarvon yksikkö on J/(kg*K). Yhtälöt ovat määritetty samassa muodossa standardeissa SFS-EN 1994-1-2 sekä SFS-EN 1993-1-2, pois lukien ferriittisen ruostumattoman teräksen yhtälö, jona käytetään lähteestä [9] esitettyä kaavaa. [12][19]

$$c_a = 425 + 7,73 * 10^{-1}\theta - 1,69 * 10^{-3}\theta^2 + 2,22 * 10^{-6}\theta^3, \quad (3.1)$$

$$\text{kun } 0 \leq \theta \leq 600 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_a = 666 - \left(\frac{13002}{\theta - 738} \right), \quad \text{kun } 600 < \theta \leq 735 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_a = 545 + \left(\frac{17820}{\theta - 731} \right), \quad \text{kun } 735 < \theta \leq 900 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_a = 650, \quad \text{kun } 900 < \theta \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_{dup} = 450 + 0,28\theta - 2,91 * 10^{-4}\theta^2 + 1,34 * 10^{-7}\theta^3 \quad (3.2)$$

$$c_{fer} = 430 + 0,26\theta \quad (3.3)$$

$$c_a = 900, \quad \text{kun } 20 \leq \theta \leq 100 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.4)$$

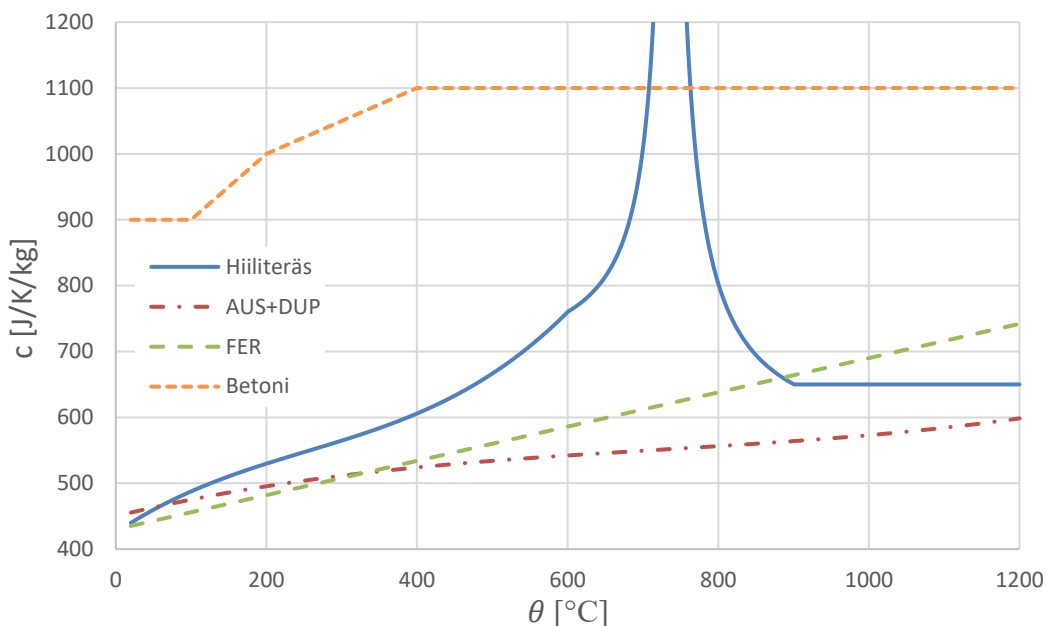
$$c_a = 900 + (\theta - 100), \quad \text{kun } 100 < \theta \leq 200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_a = 1000 + \frac{\theta - 200}{2}, \quad \text{kun } 200 < \theta \leq 400 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_a = 1100, \quad \text{kun } 400 \leq \theta \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Eurokoodi SFS-EN 1993-1-2 esittää liitteessä C mekaaniset ja termiset ominaisuudet ruostumattomille teräksille 1.4301, 1.4401, 1.4571, 1.4003 ja 1.4462. Lämpöpitenemän kaava on annettu kohdassa C.3.1(1) ja tekstissä on kerrottu kaavan pätevän austeniittisille teräslajeille. Ominaislämpökapasiteetin ja lämmönjohtavuuden kaavojen kohdalla mainitaan yleisesti vain, että ne pätevät ruostumattomille teräksille. Tästä herää kysymys, että koska teräslaji 1.4301 on ferriittinen eikä austeniittinen teräslaji, päteekö ominaislämpökapasiteetin tai lämmönjohtavuuden yhtälö myös vain austeniittisille teräkselle. Toinen vaihtoehto on, että sana austeniittinen on kirjoitusvirhe ja kaavat pätevät kaikkiin standardissa esitettyihin teräslajeihin. Tässä työssä teräslajille 1.4301 käytetään ferriittisen ruostumattoman teräksen termisiä ja mekaanisia ominaisuuksia, jotka löytyvät liitteestä [9]. Lähteessä myös arvellaan, että nämä ferriittisten teräslajien yhtälöt tulevat standardin SFS-EN 1993-1-2 seuraavaan revisioon. Ferriittisten teräslajien ominaisuuksia kuvaavien laskentakaavojen käyttö on varmalla puolella oleva vaihtoehto ainakin tämän tutkimuksen osalta. [19]

Kuvassa 3.5 on esitetty kuvaajien muodossa betonin ja käytettävien teräsmateriaalien ominaislämpökapasiteetin määrittelevät yhtälöt. Hiiliteräksen ominaislämpökapasiteetin kulmakerroin kasvaa pienillä lämpötiloilla hitaasti ja 600 °C kohdalla kasvu kiihtyy jyrkästi. 735 °C kohdalla tapahtuu sen kiderakenteeseen liittyvä faasimuutos ja hiiliteräksen ominaislämpökapasiteetti kasvaa hetkellisesti rajatta. Rajana käytetään SFS-EN 1994-1-2 mukaan kuitenkin 5000 J/(kg*K). Tämän jälkeen sen ominaislämpökapasiteetti laskee jyrkästi 900 °C kohdalla alkavaan vakioarvoon 650 J/(kg*K). [12]



Kuva 3.5 Betonin ja käytettävien teräsmateriaalien ominaislämpökapasiteetit.

Ruostumattomien teräksien ominaislämpökapasiteetit kasvavat lineaarisesti. Austeniittisilla ja Duplex teräksillä on huoneenlämmössä hiukan suurempi ominaislämpökapasiteetti kuin ferriittisillä teräksillä, mutta ferriittisillä teräksillä ominaislämpökapasiteetti kasvaa palotilanteessa jyrkemmin ja 1200 °C kohdalla ero on lähes kaksinkertainen vastakkaiseen suuntaan. Betonin ominaislämpökapasiteetti on moninkertainen teräksiin nähden. Se on huoneenlämmössä n. 900 J/(kg*K) ja kasvaa lineaarisesti kahdessa osassa välillä 100...400 °C arvoon 1100 J/(kg*K), jonka jälkeen se pysyy vakiona lämpötilan noustessa.

Betonin lämpökapasiteetti ei todellisuudessa ole neliosainen diskreetti funktio vaan monimutkaisempi, betonin kosteudesta riippuva funktio. Edellä esitetty yhtälö on jonkinlainen kompromissi, joka on esitetty standardissa SFS-EN 1994-1-2 ja se soveltuu tavanomaiselle kuivalle betonille. Kuiva tarkoittaa tässä tapauksessa betonia, joka on saavuttanut tasapainokosteuspitoisuuden, jona pidetään enintään 4 % betonin painosta. Betonissa oleva ylimääräinen kosteus alkaa höyrystyä 100 °C kohdalla ja tämä kasvattaa betonin ominaislämpökapasiteettia merkittävästi hetkellisesti. Tämä näkyisi kuvassa 3.5 piikkinä betonin ominaislämpökapasiteetissa 100 °C kohdalla ja yhtyisi lineaarisesti kuvaajaan noin 200 °C kohdalla. Piikin suuruus riippuu betonin kosteudesta ja sen ollessa 3 % betonin painosta hetkellinen ominaislämpökapasiteetti olisi 2020 J/(kg*K) ja 10 % betonin painosta se olisi 5600 J/(kg*K). Tällaisia kosteusmääriä saattaa olla juuri betonilla täytetyissä putkiliittopilarissa. Tässä tutkimuksessa käytetään betonin ominaislämpökapasiteetille kuitenkin kaavaa (3.4), koska betonin kosteuden määrään liittyy aina epävarmuutta. Varmuuden saamiseksi tulisi tehdä mittaus jo toteutetusta liittopilarista ja tämä ei sovellu kronologisesti suunnitteluprosessiin. [12]

Yhtälöissä (3.5) ... (3.8) on esitetty käytettävien materiaalien lämmönjohtavuudet lämpötilan funktiona. Niiden yksikkö on W/(m*K). Kuten edellä, yhtälöt löytyvät samassa muodossa Eurokoodeissa pois lukien ferriittisten teräslajien yhtälö, joka otetaan lähteestä [9]. Betonilla lämmönjohtavuuden arvona käytetään yläraja-arvoa, kuten standardin SFS-EN 1994-1-2 kansallinen liite velvoittaa. Kuvassa 3.6 on yhtälöt kuvattuina ja lisäksi on kuvattu betonin lämmönjohtavuuden alaraja-arvo. [7][12]

$$\lambda_a = 54 - 3,33 * 10^{-2}\theta, \quad \text{kun } 20 < \theta \leq 800 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.5)$$

$$\lambda_a = 27,3, \quad \text{kun } 800 < \theta \leq 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_{dup} = 14,6 + 1,27 * 10^{-2}\theta \quad (3.6)$$

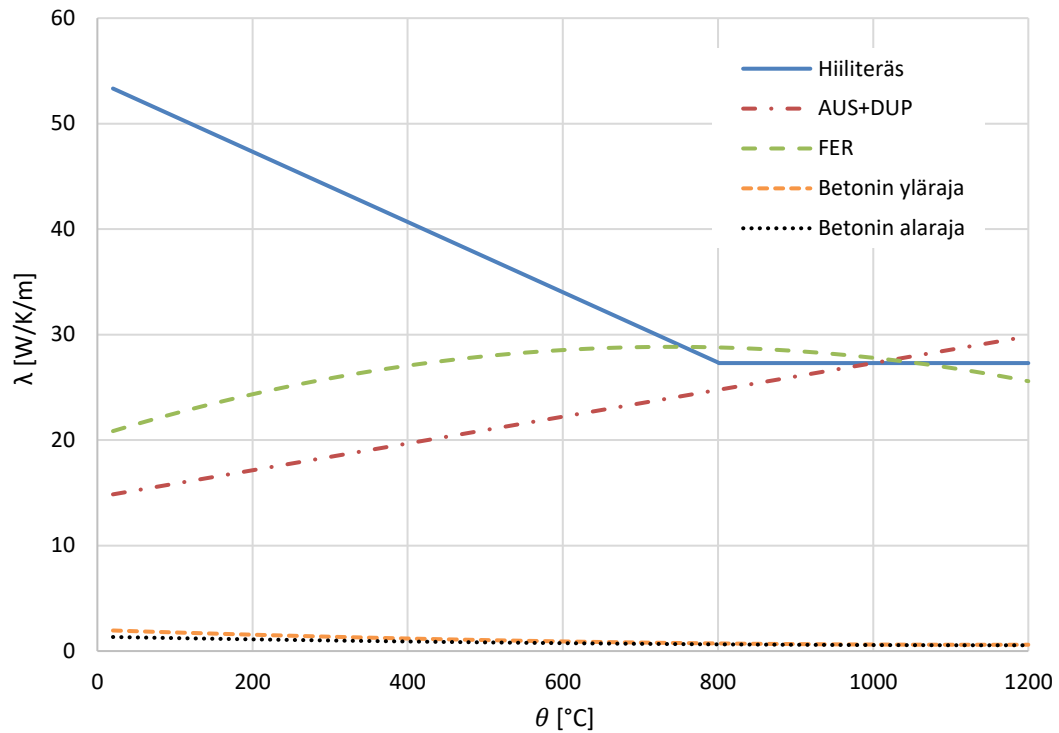
$$\lambda_{fer} = 20,4 + 2,28 * 10^{-2}\theta - 1,54 * 10^{-5}\theta^2 \quad (3.7)$$

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \frac{\theta}{100} + 0,0107 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad (3.8)$$

Ruostumattomien teräksien lämmönjohtavuudet ovat pienillä lämpötiloilla merkittävästi pienempiä kuin hiiliteräksellä. Hiiliteräksen lämmönjohtavuus laskee lineaarisesti arvoon 27,3 W/(m*K) välillä 20 ... 800 °C ja samalla välillä ruostumattomilla teräksillä lämmönjohtavuus kasvaa karkeasti samalle tasolle. Välillä 800 ... 1200 °C lämmönjohtavuuksissa ei ole suuria eroja.

Ruostumattomilla teräksillä on pienempi lämmönjohtavuus pienillä lämpötiloilla, mutta siitä on varsinaista hyötyä suunnittelussa vain lyhyiden palonkestoaikojen kohdalla kuten R15, R30 ja R45, sillä teräsprofiili lämpenee palotilanteessa nopeasti. Kohdassa 2.2 tehdyssä jäykkyysvertailussa esimerkiksi teräsprofiilin CHS 273x8,0 lämpötila seinämän keskikohdassa on 15 minuutin palon kohdalla 432 °C, 30 minuutin kohdalla 697 °C ja 45 minuutin kohdalla 815 °C teräslajilla S355. Vastaavat arvot teräslajilla 1.4003 ovat 346 °C, 609 °C ja 764 °C sekä teräslajilla 1.4301 ne ovat 344 °C, 611 °C ja 767 °C. Tässä esimerkissä ruostumattomien teräksien lämpötilat ovat hyvin lähellä toisiaan. Teräslajin S355 lämpötila on teräslajin 1.4301 lämpötilaa 24,9 % suurempi 15 minuutin palon kohdalla, puolen tunnin kohdalla 14,1 % ja 45 minuutin kohdalla enää vain 6,3 % suurempi. Teräsprofiilien lämpötilojen suuruuteen vaikuttaa keskeisesti myös teräslajin emissiivisyys ja sitä analysoidaan yksityiskohtaisemmin kappaleessa 5.2.

Yhtälöissä (3.9)... (3.11) on betonin ja teräsmateriaalien lämpöpitenemät. Toisin kuin edellä sekä ferriittisellä että austeniittisellä että austeniittis-ferriittisellä ruostumattomalla teräksellä on sama lämpöpitenemä ja sitä merkitään alaindeksillä rst.



Kuva 3.6 Betonin ja käytettävien teräsmateriaalien lämmönjohtavuudet.

$$\Delta L_a = (-2,416 * 10^{-4} + 1,2 * 10^{-5}\theta + 0,4 * 10^{-8}\theta^2)L, \quad (3.9)$$

kun $20 < \theta \leq 750 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Delta L_a = 11 * 10^{-3}L, \quad \text{kun } 750 < \theta \leq 860 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta L_a = (6,2 * 10^{-3} + 2 * 10^{-5}\theta)L, \quad \text{kun } 860 < \theta \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

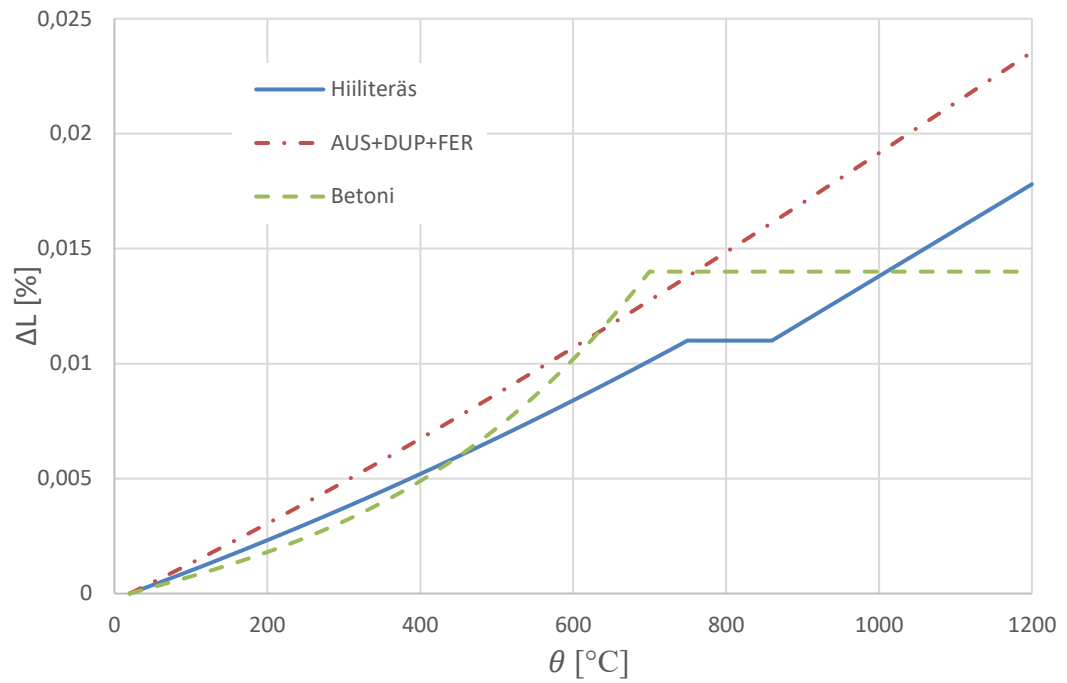
$$\Delta L_{rst} = (16 + 4,79 * 10^{-3}\theta - 1,243 * 10^{-3}\theta^2) * \frac{\theta - 20}{10^6}L \quad (3.10)$$

$$\Delta L_c = (-1,8 * 10^{-4} + 9 * 10^{-6}\theta + 23 * 10^{-11}\theta^3)L, \quad (3.11)$$

kun $20 < \theta \leq 700 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Delta L_c = 0,014L, \quad \text{kun } 700 < \theta \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Edellisissä yhtälöissä L on kappaleen alkuperäinen pituus $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ kohdalla. Kuvassa 3.7 on kuvaukset edellisistä yhtälöistä. Materiaalien lämpöpitenemät käyttäytyvät saman kaltaisesti ja merkittäviä eroja niiden suuruuksissa ei ole. Betonilla ja hiiliteräksellä on vakioalue, jossa lämpöpitenemä ei kasva lämpötilan noustessa. Hiiliteräksellä se on hetkellinen ja betonilla pysyvä. Ruostumattomien teräksien lämpöpitenemä on melko suoraviivainen, ja kevyesti nouseva tarkasteltavalla alueella.



Kuva 3.7 Hiili-, ruostumattomien teräksien ja betonin lämpöpitenevät.

4. POIKKILEIKKAUKSEN PURISTUS- JA TAIVUTUSKESTÄVYYDET

4.1 Puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutus

Liittopilarin mitoitusta muistuttaa teräsbetonipilarin mitoitusta. Mitoituksessa etsitään rakenteelle suurin normaalivoiman N ja sitä vastaavan taivutusmomentin M arvo, jotka riippuvat rakenneteräksen, betonin ja mahdollisen raudoituksen poikkileikkauksista. Normaalivoima- ja taivutusmomenttikestävyys ovat riippuvaisia toisistaan siten, että poikkileikkauksen on pystyttävä vastaanottamaan molemmat rasitukset samanaikaisesti. Esimerkiksi, jos poikkileikkaus on täysin puristettu, niin se ei pysty enää vastaanottamaan taivutuksesta aiheutuvaa lisäpuristusta, mutta täysin taivutettuna poikkileikkaus kestää vielä tietyn määrän puristuskuormaa. Samankaltainen normaalivoiman ja taivutusmomentin piste (N, M) voidaan laskea siten, että asetetaan neutraaliakseli jokaiseen eri poikkileikkauksen pisteeseen ja lasketaan jännitysresultanttien N ja M suuruudet. Lausekkeet ovat yleisessä tapauksessa muotoa

$$\left\{ \begin{array}{l} N = \sum_{i=a,s,c} \int_{A_i} \sigma_i dA_i \\ M = \sum_{i=a,s,c} \int_{A_i} \sigma_i y dA_i \end{array} \right. , \sigma_a = \frac{f_y}{\gamma_a}, \sigma_s = \frac{f_{sk}}{\gamma_s}, \sigma_c = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}. \quad (4.1)$$

Jännitysresultanttien arvot voidaan laskea mielivaltaisessa määrässä pisteitä, mutta kuitenkin yleensä vähintään neljässä, joita käsitellään yksityiskohtaisemmin tässä myöhemmin kappaleessa. [2]

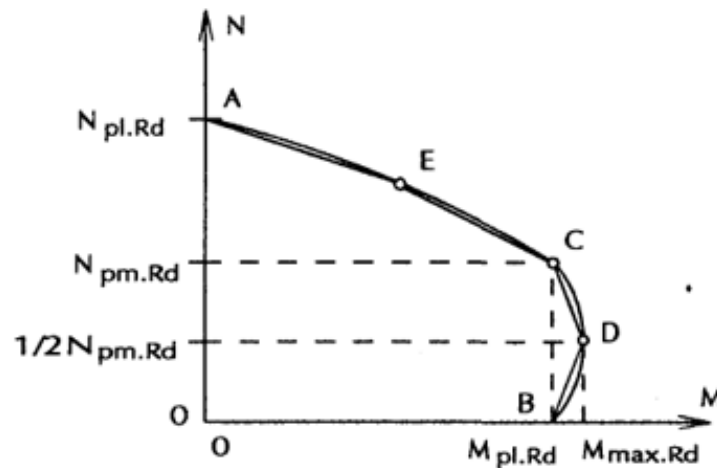
Koordinaattipisteiden (N, M) joukko muistuttaa vaakasuuntaista paraabelia, joka kasvaa negatiivisen M -akselin suuntaan. Tätä pisteiden joukkoa kutsutaan yhteisvaikutuskäyräksi ja se toimii liittopilarin mitoituksen peruseriaatteena. Kuormituksen puristusvoiman ja taivutusmomentin yhdistelmä on oltava tämän yhteisvaikutuskäyrän sisällä. Yhteisvaikutuskäyrän muodostamista standardin SFS-EN 1994-1-1 mukaisella yksinkertaisella laskentamenetelmällä käydään läpi tarkemmin myöhemmin tässä kappaleessa. Kuvassa 4.1 on esitetty esimerkki yhteisvaikutuskäyrästä. [2]

Edellinen menetelmä on esitetty Eurokoodin esistandardissa SFS-ENV 1994-1-1 liitteessä C ja sen muodosti Roik ja Bergmann vuonna 1992. Menetelmää käsiteltiin ensikerran ECCS:n julkaissa *Composite Structures* [25], joka julkaistiin vuonna 1981 ja sitä

kehitettiin saksalaisessa standardissa DIN 18800 vuonna 1998. Eri versiot johtavat hie-
man erilaisiin tuloksiin, mutta ero on lähinnä tavoittelussa varmuustasossa. Eroavaisuudet
näkyvät merkittävimmin hoikissa liittopilarissa. [2][4]

Standardiin SFS-EN 1994-1-1 menetelmä ei päätenyt tuntemattomasta syystä. Esistan-
dardia voidaan kuitenkin käyttää standardin SFS-EN 1994-1-1 käsikirjana ja lähdekirjal-
lisuutena ja se sisältää muutamia asioita, joita ei nykyisessä standardissa käsitellä, kuten
poikkileikkauksen kestävyysien $M_{pl.Rd}$ ja $N_{pl.Rd}$ laskentamenetelmät, liittopilarin murtu-
mistavat, leikkausliitos ja -liittimet sekä voimien siirtyminen pilari-palkki liitoksessa.
Laskentamenetelmä on validi, sillä se perustuu tekniseen taivutusteoriaan. Liittopilarin
mitoitukseen liittyvässä kirjallisuudessa sekä kotimaisessa että eurooppalaisessa tätä me-
netelmää on suositettu, koska se on käytettävyydeltään ainoa keino, jolla voidaan lasken-
nallisesti, mutta kuitenkin ilman tietokoneohjelmistoja, todeta rakenteen kestävyys ja sa-
malla saada taloudellinen lopputulos. [4][3]

Eurokoodi SFS-EN 1994-1-1 ei aseta vaatimuksia liittopilaripoikkileikkaukselle ylei-
sessä tapauksessa, mutta ei myöskään ohjeista epäsymmetristen tai muuten poikkeuksel-
listen poikkileikkausten laskentaa. Yleinen menetelmä ei sovellu jokapäiväiseen raken-
nesuunnitteluun ja sen käyttö rajoittuu käytännöllisesti katsoen akateemiseen tutkimus-
työhön. Vaihtoehtoisiksi jää Standardin SFS-EN 1994-1-2 liitteessä H esitetty yksinker-
tainen laskentamalli, jolla on hyvin rajattu sovellusalue, tai SFS-ENV 1994-1-1 mukainen
yksinkertainen laskentamalli. Tässä tutkimuksessa laskelmat suoritetaan esistandardin
SFS-ENV 1994-1-1 mukaisella laskentamenetelmällä. [4][3][12]



Kuva 4.1 Yleinen yhteisvaikutuskäyrä. [2]

Liittopilariin oletetaan kehittyvän täysi plastisuusteorian mukainen puristuskestävyys,
mikäli nurjahdus tai lommahdus ei sitä estä. Sen lause on

$$N_{pl.Rd} = N_{a.Rd} + N_{c.Rd} + N_{s.Rd} = A_a f_{yd} + \alpha_{cc} A_c f_{cd} + A_s f_{sd}. \quad (4.2)$$

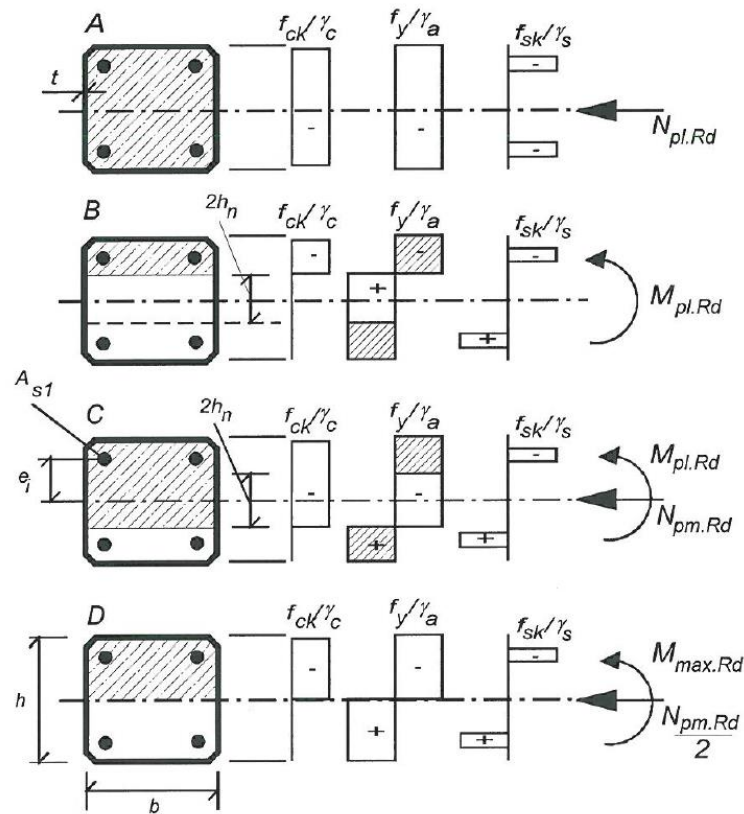
Alaindeksit a , c ja s tarkoittavat teräs, betoni ja betonirauditus lausumisjärjestyksessä. Betonilla täytetyillä teräsprofiililiittopilareilla käytetään kerrointa $\alpha_{cc} = 1,0$ [3]. Muissa liittopilaripoikkileikkauksissa käytetään kerrointa $\alpha_{cc} = 0,85$.

Liittopilarin suurin puristuskestävyys $N_{pl,Rd}$ kuvaa yhteisvaikutuskäyrän pistettä $(0, N_{pl,Rd})$ ja sitä kutsutaan yleensä kirjallisuudessa pisteeksi A. Poikkileikkauksen suurinta puristuskestävyyttä ei käytännössä voida saavuttaa, koska pilariin syntyy pakosti epäkeskisyyden ja toisen kertaluvun vaikutuksista taivutusmomenttia. Koordinaattipisteessä $(M_{pl,Rd}, 0)$ on pilarin taivutusmomenttikestävyyden arvo, kun pilariin vaikuttaa vain taivutusmomentti. Tätä kutsutaan pisteeksi B. [2]

Yhteisvaikutuskäyrän pisteessä $(N_{pm,Rd}, M_{pl,Rd})$ puristuskestävyys on betonipoikkileikkauksen puristuskestävyys ja taivutuskestävyyden arvo on liittopilaripoikkileikkauksen taivutuskestävyys kuten pisteessä B. Viimeinen helposti laskettava piste sijaitsee koordinaateissa $(N_{pm,Rd}/2, M_{pl,max})$, jossa liittopilaripoikkileikkauksen puristuskestävyys on puolet betonin puristuskestävyydestä ja taivutuskestävyys on koko poikkileikkauksen suurin mahdollinen taivutuskestävyys, joka on yleensä vain marginaalisesti suurempi kuin taivutuskestävyyden arvo pisteessä C. [2]

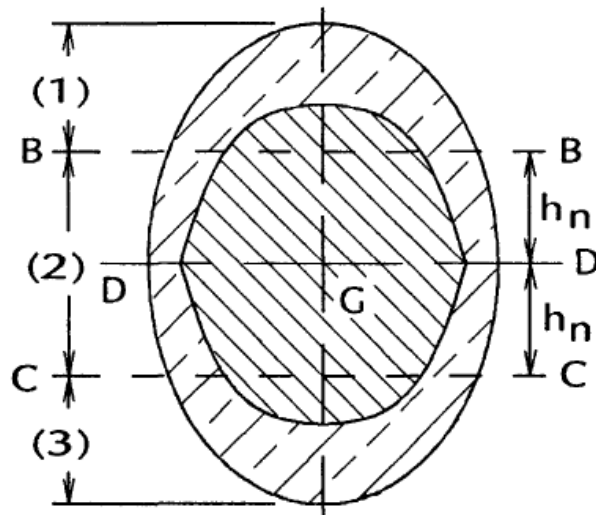
Edelliset pisteet voidaan myös kuvata poikkileikkauksen jännitys jakaumien avulla, jotka on esitetty kuvassa 4.2. Vinoviivarasteri kuvaa puristusta ja rasterioimaton alue on vetoa. Jännitykset kuvaavat poikkileikkauksen suurimpia plastisia jännityksiä, joita se kestää murtumatta. Kuten betonin mitoituksessa yleensä, betonille ei sallita vetojännitystä sen haurauden johdosta. [2]

Pisteessä B poikkileikkaukseen vaikuttaa vain taivutusmomentti. Tämä tuottaa poikkileikkaukseen jännitys jakauman, jossa taivutusneutraaliakselin sijainti on mitan h_n päässä vastaavan isotrooppisen poikkileikkauksen neutraaliakselista. Kun poikkileikkausta rasittava puristukuorma kasvaa hieman, alkaa taivutusneutraaliakseli siirtyä lähemmäksi symmetria-akselia, jolloin myös taivutusmomenttikestävyys kasvaa. Kuormitusta lisäämällä taivutusmomenttikestävyys jatkaa kasvamista, kunnes taivutusneutraaliakseli saavuttaa symmetria-akselin, jonka jälkeen se alkaa pienentyä. Pisteessä C taivutusneutraaliakseli on yhtä kaukana symmetria akselista kuin pisteessä B ja taivutusmomentitkestävyys on sama kuin pisteessä B. Poikkileikkauksen puristuskestävyys on kasvanut taivutusneutraaliakselin liikkeessä pisteestä B pisteeseen C arvoon $N_{pm,Rd}$. [2]



Kuva 4.2 Liittopilaripoikkileikkauksen eri jännitysjaumat perustapauksissa. [4]

Pyöreillä poikkileikkauksilla käytetään merkinnän h_n sijasta merkintää D_n . Yleisesti merkintöjä käytetään synonyymeinä ja niin tehdään myös tässä työssä.



Kuva 4.3 Liittopilaripoikkileikkaus, joka on molempien pääsuuntien suhteen symmetrinen. [2]

Merkitään osia numeroin 1, 2 ja 3 sekä materiaaleja c , a ja s ja lisäksi osien kestävyys R_{ij} . Osiin jakaminen on esitetty kuvassa 4.3. Puristuskestävyyden muutos alkaen pisteestä B pisteeseen C on

$$N_{pm.Rd} - 0 = R_{c1} + |R_{a1}| + |R_{a2}| - |R_{a3}| + |R_{s1}| - |R_{s2}| - (R_{c1} + R_{c2} + |R_{a1}| + |R_{a2}| + |R_{a3}| + |R_{s1}| + |R_{s2}|). \quad (4.3)$$

Ja lauseke sievenee muotoon

$$N_{pm.Rd} = R_{c2} + 2|R_{a2}|. \quad (4.4)$$

Symmetriasta saadaan myös lisäehtot

$$R_{a1} = |R_{a3}| \text{ ja } R_{s1} = |R_{s3}|. \quad (4.5)$$

Pisteessä B jännitysresultantti on

$$R_{c1} + R_{a1} - |R_{a2}| - |R_{a3}| + R_{s1} - |R_{s2}| = 0, \text{ eli } R_{c1} = R_{a2}. \quad (4.6)$$

Yhdistämällä kaavat (4.6) ja (4.4) sekä symmetriaehto (4.5) saadaan pisteen B puristuskestävyydeksi

$$\begin{aligned} N_{pm.Rd} = R_{c2} + R_{c1} + R_{c3} &= \frac{\alpha_{cc}A_{c1}f_{cd}}{\gamma_c} + \frac{\alpha_{cc}A_{c2}f_{cd}}{\gamma_c} + \frac{\alpha_{cc}A_{c3}f_{cd}}{\gamma_c} \\ &= N_{c.Rd}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Lisäksi symmetriaehdosta voidaan päätellä, että pisteen D puristuskestävyys on oltava puolet edellisestä tuloksesta eli $N_{c.Rd}/2$.

Betonin puristuskestävyys $N_{c.Rd}$ on triviaali laskentaprosessi kuten on myös suurimman taivutuskestävyyden $M_{pl,max}$ laskenta. Taivutuskestävyyden arvon $M_{pl.Rd}$ laskennassa on otettava huomioon, että taivutusneutraaliakselin sijainti on siirtynyt mitan h_n etäisyydelle symmetria-akselista eli taivutuskestävyyden arvo on siirtymän jälkeen

$$M_{pl.Rd} = M_{pl,max} - M_{n.Rd}, \quad (4.8)$$

Puristuksen aiheuttama lisämomenttikestävyys $M_{n.Rd}$ esittää kuvien 4.2 ja 4.3 $2h_n$ korkuiseen poikkileikkauksen taivutuskestävyyttä. Mitta h_n pystytään selvittämään geometrian avulla, sillä se on eräänlainen tasapainoehto. Sen mukaan kuvan 4.3 alueella 1 olevan betonin puristuskestävyys on oltava yhtä suuri kuin akselien D-D ja B-B rajaaman alueen rakenneteräksen sekä raudoituksen vetokestävyyksien summa. Joissain tilanteissa mitta h_n voidaan laskea melko yksinkertaisesti. Näitä tapauksia ovat tilanne, jossa betoniraudoitusta ei ole ollenkaan tai betoniraudoitusta ei ole akselin B-B tai C-C kohdalla. Mikäli akselien kohdalla on betoniraudoitusta, laskenta hankaloituu merkittävästi ja matemaattisesti validin sulkulausekkeen muodostamisesta tulee erittäin hankalaa. Todellinen tulos

voidaan selvittää käytännöllisesti katsoen joko jollakin tietokoneohjelmistolla tai iteratiivisella laskennalla, jotka molemmat eivät palvele jokapäiväistä suunnittelutyötä.

Eurokoodin esistandardissa SFS-ENV 1994-1-1 on lisäksi esitetty lisäpiste E. Se sijaitsee pisteiden A ja C välissä ja sen tarkoitus on tarkentaa yhteisvaikutuskäyrän muotoa. Standardi SFS-ENV 1994-1-1 ohjeistaa asettamaan lisäpisteen etäisyydelle

$$h_E = \frac{h_N}{2} + \frac{h}{4}, \quad (4.9)$$

mutta se voidaan asettaa käytännössä mielivaltaiseen pisteeseen, joka on kauempana symmetria-akselista kuin h_n . Lisäpisteitä ei myöskään rajoiteta yhteen vaan niitä voi olla mielivaltaisen määrä. Tosin laskentakaavat pitenevät jokaisella uudella pisteellä. Pisteen E vaikutus on esitetty edellä kuvassa 4.1. [2]

Kirjallisuudessa esitetään mitan h_n laskennalle kahta erilaista peruseriaa. Toisessa menetelmässä betoniraudoitusta ei oteta huomioon ollenkaan ja toisessa otetaan huomioon, mikäli betonirauditus on akselien B-B ja C-C rajaaman alueen sisällä. Ensimmäistä menetelmää käytetään esimerkiksi Liittorakenteiden suunnittelu ja mitoitus Eurocode 4 – oppikirjassa (TRY/by58) ja toista Eurokoodin esistandardissa SFS-ENV 1994-1-1. Laskentakaavat ovat

$$h_n = \frac{A_c f_{cd}}{2b f_{cd} + 4t(2f_{yd} - f_{cd})} \text{ ja} \quad (4.10)$$

$$h_n = \frac{N_{pm.Rd} - A_{sn}(2f_{sd} - f_{cd})}{2b f_{cd} + 4t(2f_{yd} - f_{cd})}. \quad (4.11)$$

Kaavoilla (4.10) [4] ja (4.11) [2] voidaan laskea myös suorakaidepoikkileikkauksen leveyssuunnan puhtaana taivutuksen neutraaliakselin korkeus vaihtamalla h ja b arvot päinvastaisiksi. Lisäksi pyöreälle poikkileikkaukselle kaavat antavat likimääräisarvon vaihtamalla suorakaiteen korkeus h pyöreän profiilin halkaisijaan D . [3]

Standardin SFS-ENV 1994-1-1 menetelmä ei ole aina käyttökelpoinen, sillä sen osoittajassa on alueella $2h_n$ olevan raudoituksen pinta-ala A_{sn} . Tämän vuoksi mitan h_n sijainti on aluksi arvattava. Jos betoniraudoitusta on akselin kohdalla, pitää tarkka tulos selvittää eritavalla. Menetelmät ovat yksinkertaistuksia, joiden avulla suunnittelutyöstä pyritään tekemään sujuvampaa ja ne ovat lisäksi varmalla puolella olevia yksinkertaistuksia. Toisaalta on muistettava, että mitta h_n määrää yhtä aikaisen puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutuskuvaajan pinta-alan eli taivutuskestävyyden arvot pisteissä B sekä C ja sen tarkasta laskemisesta on etua varsinkin raskaasti raudoitetuissa poikkileikkauksissa. Normaaliämpötilamitoituksessa saadaan yksinkertaistetuilla kaavoilla varsin hyväksyttäviä tuloksia keskeisesti puristetulle liittopilarille, mutta palomitoituksessa poikkileikkauksen

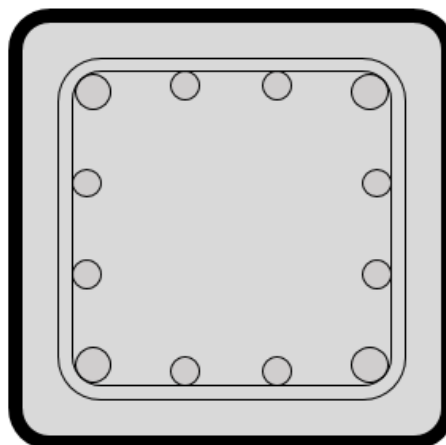
taivutusjäykkyys laskee merkittävästi ja sitä kautta toisen kertaluvun vaikutukset ottavat suuremman roolin. Vaikka poikkileikkaukseen vaikuttaisi keskeinen puristuskuorma; hoikkuuden takia taivutusrasituksista tulee todella merkittäviä. Tästä seuraa, että optimaalinen ja siten taloudellisen poikkileikkauksen mitoituspiste on lähellä pistettä C. Suurimmassa osassa todellisista liittopilareista juuri palomitoitus on mitoittava tilanne. [2][4]

Kuvassa 4.1 alueen BCD käyttöön on säädetty Eurokoodissa lisäehtoja. Niissä kuormien osavarmuuskertoimia muutetaan, mikäli kuormituspiste (N , M) on alueella BCD ja mikäli normaalivoima ja taivutusmomentin syntyvät eri kuormituksista. Eli esimerkiksi, jos taivutusmomentti aiheutuu tuulesta ja normaalivoima rakenteiden omapainosta, aluetta BCD voidaan käyttää, mutta omapainojen varmuuskerrointa on pienennettävä 20 %, standardin SFS-EN 1994-1-1 kohdan 6.7.1(7) mukaan. Tämä vaikuttaa siis myös yhteisvaikutuskäyrän AECBD pisteisiin ja laskenta on käytännössä suoritettava uudelleen. [3]

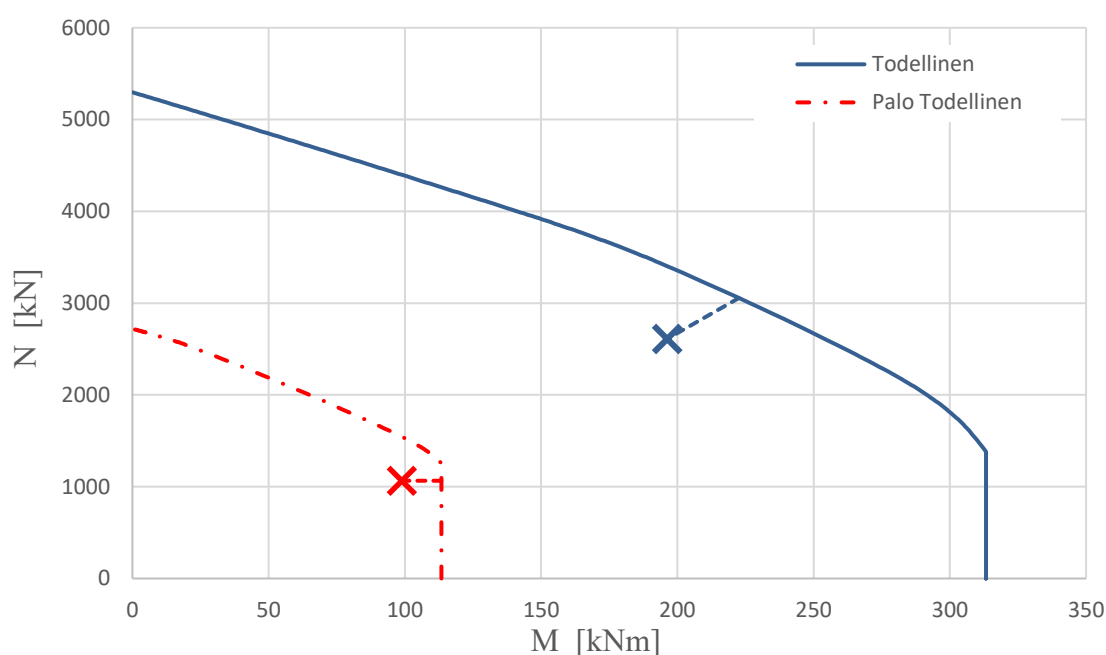
Kyseisellä alueella suurimman taivutusmomentin saavuttamiseksi poikkileikkaukseen on oltava myös puristettu. Sen johdosta muuten merkityksettömällä puristuskuorman muutoksella yhteisvaikutuskäyrän sallittu alue saattaa ylittyä. Tämä saattaa johtua esimerkiksi betonin tilavuuspainon epätarkkuudesta tai kuormien osavarmuuskertoimista, mutta puristuskuorma saattaa kehittyä liian suureksi myös tavallisen ja oikealla tavalla suoritettun suunnitteluprosessin aikana. Tässä tutkimuksessa käytetään mitoituksessa sallittuna alueena kuvan 4.1 mukaisen yhteisvaikutuskäyränä aluetta AECB.

Kuvassa 4.4 on esitetty erään liittopilarin poikkileikkaus ja kuvassa 4.5 on esitetty sen tarkasti lasketut yhteisvaikutuskuvaajat sekä normaalilämpötilassa että palotilanteessa. Liittopilaripoikkileikkaus on SHS 250x250x8,0 (S355), betonirauditus 4T20+8T16 (B500B) ja betonin lujuusluokka C40/50. Paloluokka on R60 ja betonin suojapeitepaksuus 20 mm. Yläpuolisen rakenteen omapaino on 800 kN ja hyötykuorma 1800 kN. Liittopilarisiin vaikuttaa ulkoinen momentti, joka muodostuu välipohjan epätasapainoisesta liitoksesta siten, että pilarin yläpäässä momentti on 150 kNm ja alapäässä -50 kNm. Lisäksi taivutusmomenttia muodostuu mitoitusnormin oletetuista epätäydellisyyksistä kuten normaalivoiman epäkeskisyydestä, pilarin vinoudesta sekä pilarin käyryydestä. Edellä mainitut kuormat ovat mitoituskuormia. Palomitoituksessa pysyvän kuorman määrä on $800 / 1,15 = 696$ kN ja hyötykuorman $1800 / 1,5 * 0,3 = 360$ kN. Normaalilämpötilassa lopullinen kuormituspiste on (196, 2611) ja palotilanteessa (98,9, 1065). Välipohjilta muodostuvat taivutusmomentit oletetaan siirtyvän tarkasteltavan palotilassa olevan pilarin ylä- ja alapuolella sijaitseville palolta suojatuille pilareille kohdassa 2.1 kuvatulla tavalla.

Normaalilämpötilan käyttöaste on 86,9 % ja palomitoituksessa 87,2 %. Pilarin suurin plastinen taivutusmomenttikestävyys $M_{pl,Rd} = 313$ kNm ja suurin plastinen puristuskestävyys $N_{pl,Rd} = 5297$ kN. Vastaavat arvot palotilanteessa ovat $M_{pl,Rd,fi} = 113$ kNm ja $N_{pl,Rd,fi} = 2725$ kN. Yhteisvaikutuskuvaajasta on poistettu kuvan 4.1 alue BCD. Lisäksi kuvajassa on otettu huomioon mitoitusnormin α_M -kerroin, joka on teräslajin S355 tapauksessa normaalilämpötilassa 0,9 ja palotilanteessa 1,0.



Kuva 4.4 Liittopilaripoikkileikkaus SHS 250x250x8,0 ja betoniraudoitus 4T20+8T16



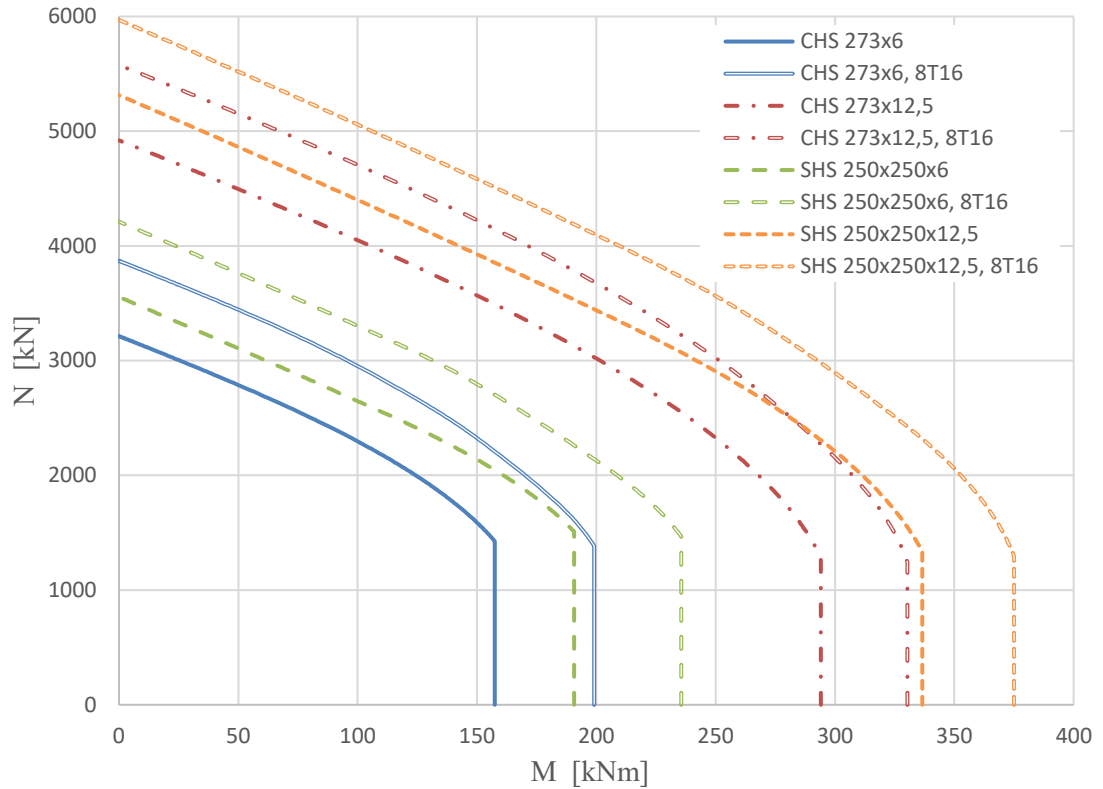
Kuva 4.5 Kuvan 4.4 liittopilarin yhteisvaikutuskuvaaja normaalilämpötilassa sekä palotilanteessa R60. Ylemmässä kuvaajassa on normaalilämpötila ja alemmassa palotilanne. Rastit kuvaavat mitoituspisteitä (N_{Ed} , M_{Ed}) ja ($N_{Ed,fi}$, $M_{Ed,fi}$) ja ne on yhdistetty lähimpään pisteeseen niiden yhteisvaikutuskuvaajalla.

Kuvasta 4.5 nähdään, että palotilanteen ja normaalilämpötilan välinen puristuskuorman suhde on karkeasti puolet ja taivutusmomentin kolmasosa. Nämä suhteet vaihtelevat liittopilarin poikkileikkauksen myötä ja merkityksellisin osa-alue on betoniraudoituksen koko ja sijoittelu. Kuvan 4.4 liittopilari on tiheästi raudoitettu ja poikkileikkauksen raudoitussuhde on 5,5 %. Palotilanteen taivutusmomenttikestävyys riippuu merkittävästi raudoitussuhteesta ja sen myötä esimerkissä on taivutusmomenttikestävyys tavanomaista suurempi. Toisaalta kuvan 4.4 betoniraudoituksen sijoittelu on suunnittelun näkökannalta optimaalinen, mutta käytännössä kuormansiirto-osat, kuten puukkolevyt tai konsolit oh-

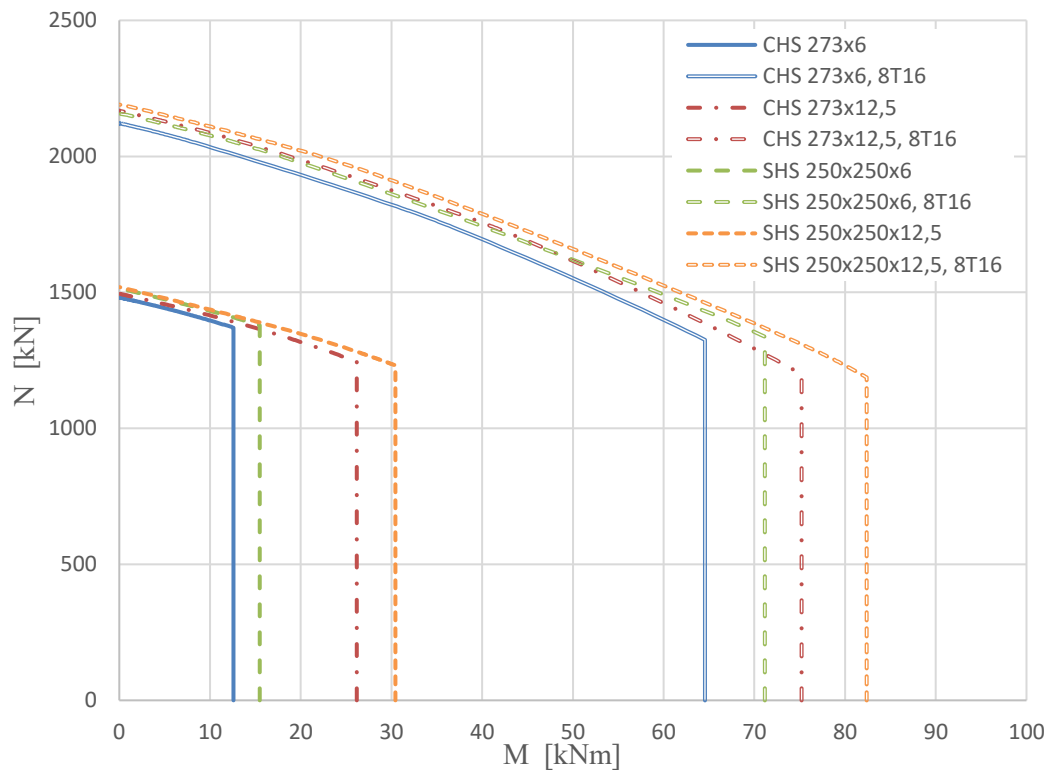
jaavat pääraudoituksen sijaintia. SFS-EN 1994-1-1 määrää kohdassa 6.7.3.1 poikkileikkauksen raudoitussuhteen suurimman arvon 6 % kun käytetään yksinkertaistettua laskentamenetelmää. Ottaen huomioon edellä mainitut yksityiskohdat liittopilarin betoniraudoitus on käytännössä suunniteltava siten, että sen kulmissa on suuret tangot ja vain tarvittaessa keskialueilla pienempiä raudoitustankoja. Lisäksi on mahdollista käyttää myös tankonippuja nurkissa, joka esimerkin tapauksessa olisi hyödyllistä. Tällöin voidaan hyödyntää myös taivutusjäykkyyden lisäys kokonaisuudessaan (tai lähes kokonaan) molempien pääakselin ympäri. Kuvan 4.4 esimerkin tapauksessa parempi ratkaisu olisi sijoittaa halkaisijaltaan 25 mm tangot kulmiin ja keskiväleihin yhdet 16 mm tangot ja päädyttäisiin hyväksyttävään ratkaisuun. Poikkileikkauksen raudoitusmäärä laskisi 0,2 prosenttiyksikköä ja käyttöaste laskisi normaalilämpötilassa 0,4 % ja palotilanteessa 13,9 %. [3]

Seuraavassa pohditaan laajemmin yhdistetyn puristuksen ja taivutusmomentin yhteisvaikutuskuvaajia normaalilämpötilassa sekä palotilanteessa R60 eräille neliö- ja pyöröprofiileille kevyesti raudoitettuna ja lisäksi ilman betoniraudoitusta. Tulokset on esitetty kuvissa 4.6 ja 4.7. Poikkileikkauksen lämpötilan laskeminen tapahtuu samalla tavalla kuin edellä kohdassa 2.2. Normaalilämpötilassa betoniraudoituksen 8T16 lisääminen suurentaa poikkileikkauksen normaalivoima- sekä taivutusmomenttikestävyyksiä. Suhteessa eniten lisäkestävyyttä aiheutuu poikkileikkauksiin, joiden teräsprofiilin seinämävahvuus on pieni. Lisäksi kestävyys kasvaa hieman enemmän pyöreillä profiileilla, mutta niiden välinen ero on lähinnä marginaalinen. Pyöreän profiilin CHS 273x6,0 tapauksessa betoniraudoituksen lisääminen aiheuttaa 26 % kasvun normaalivoimakestävyyteen ja 20 % kasvun taivutusmomenttikestävyyteen. Neliöprofiilin SHS 250x250x6,0 vastaavat kestävyysarvojen kasvut ovat 24 % ja 18 %. Profiilin CHS 273x12,5 kestävyys kasvaa 12 % ja 13 % ja SHS 250x250x12,5 kohdalla 11 % ja 12 %, samassa mainitsemisjärjestyksessä.

Palotilanteessa betoniraudoituksen läsnäolo ilmenee taivutusmomenttikestävyyksien suuressa positiivisella muutoksella ja normaalivoiman tapauksessa pienemmällä, mutta kuitenkin merkittävällä kasvulla. Betoniraudoituksen lisääminen kasvattaa taivutusmomenttikestävyyksiä moninkertaiseksi. Pienemmän seinämävahvuuden profiileissa taivutusmomenttikestävyys kasvaa pyöreällä 413 % ja neliöllä 360 %. Profiileilla CHS 273x12,5 ja SHS 250x250x12,5 taivutusmomenttikestävyyksien kasvut ovat 187 % ja 171 %. Normaalivoimakestävyys kasvaa kaikilla esimerkin profiileilla suhteessa lähes yhtä paljon, n. 42 – 45 %. Edellä havaitaan, että liittopilari saattaa toimia hyvin normaalilämpötilassa raudoittamattomanakin, mutta mikäli siltä vaaditaan jotakin oleellista palonkestoa, on käytettävä betoniraudoitusta.



Kuva 4.6 Eräiden liittopilariprofiilien yhdistetyn puristuksen ja taivutusmomentin yhteisvaikutuskuvaajat normaalilämpötilassa.



Kuva 4.7 Eräiden liittopilariprofiilien yhdistetyn puristuksen ja taivutusmomentin yhteisvaikutuskuvaajat palotilanteessa R60.

4.2 Vino taivutus

Suorakaiteen ja neliön muotoisilla poikkileikkauksilla yhteisvaikutuskäyrä voi olla erilainen riippuen taivutusmomentin suunnasta. Tilannetta, jossa poikkileikkausta rasittaa taivutusmomentit molempien pääakselien suunnassa saman aikaisesti kutsutaan vinoksi taivutukseksi. Yhteisvaikutuskäyrän akselit ovat vinossa taivutuksessa kuvan 4.4 merkin­nöllä M_x ja M_y . Eurokoodin mukaisessa mitoituksessa vinon taivutuksen pitää toteuttaa ehdot

$$\begin{cases} \frac{M_{y.Ed}}{\mu_{dy}M_{pl.y.Rd}} \leq \alpha_M \\ \frac{M_{x.Ed}}{\mu_{dx}M_{pl.x.Rd}} \leq \alpha_M \end{cases} \quad (4.12)$$

ja yhdistetyssä taivutuksessa

$$\frac{M_{y.Ed}}{\mu_{dy}M_{pl.y.Rd}} + \frac{M_{x.Ed}}{\mu_{dx}M_{pl.x.Rd}} \leq 1, \quad (4.13)$$

missä M_{Ed} on suurin taivutusmomentti liittopilarin pituudella,

$M_{pl.Rd}$ on liittopilarin suurin taivutusmomenttikestävyys,

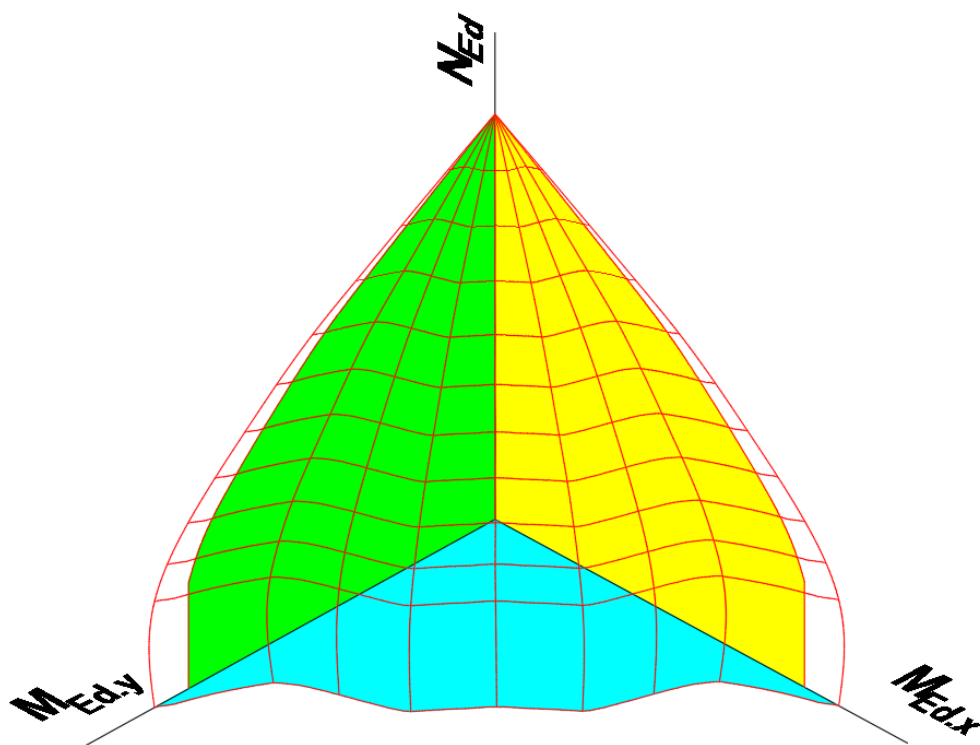
μ on suhteellinen taivutusmomentti, joka ottaa huomioon normaali­voiman vaikutuksen taivutusmomenttikestävyyteen ja

α_M on teräslajin lujuusluokasta riippuva kerroin. [3]

Suhteellinen momentti on monissa kirjallisuuden lähteissä selitetty monimutkaisesti jän­nityssuorakaiteiden avulla, mutta se on melkoisesti yksinkertaisempaa sisäistää graafi­sesti yhteisvaikutuskäyrästä. Poikkileikkauksen, joka on esitetty kuvan 4.4 tapauksessa normaalilämpötilan mitoitus­pisteen kohdalla, suhteellinen momentti on 0,81, koska tai­vutuskestävyys yhteisvaikutuskäyrällä on 254 kNm ja se on 81% suurimmasta taivutus­kestävyydestä 313 kNm. Palotilanteessa suhteellinen momentti on 1,0, sillä mitoittavaa puristuskuormaa vastaava suurin taivutuskestävyys ei ole laskenut puristuskuorman seu­rauksesta. On mainittava, että kuvassa 4.4 ja myös kuvissa 4.5 ... 4.7 kerroin α_M on otettu huomioon eli taivutusmomenttikestävyyttä on normaalilämpötilassa pienennetty koko yhteisvaikutuskuvaajan alueella kertoimella 0,9, kun teräslajina käytetään kaikissa ta­pauksissa teräslajia S355.

Kerrointa α_M ei ole selitetty kovin selkeästi Eurokoodissa eikä muussa kirjallisuudessa. Kuitenkin sen perusta on, että teräksen lujuuden kasvaessa sen sitkeys laskee eli ne muuttuvat hauraammiksi. Teräslajeille S235...355 α_M on asetettu 0,9 sekä teräslajien S420 ja S460 tapauksessa 0,8. Kerroin laskee suoraan normaalivoiman ja yhden pääakselin suhteen tapahtuvan taivutuksen suurinta taivutuskestävyyttä joko 10 % tai 20 %. Kerroin α_M ei viimekädessä yleensä rajaa liittopilarin kestävyyttä, koska palotilanteessa sitä ei käytetä. [3]

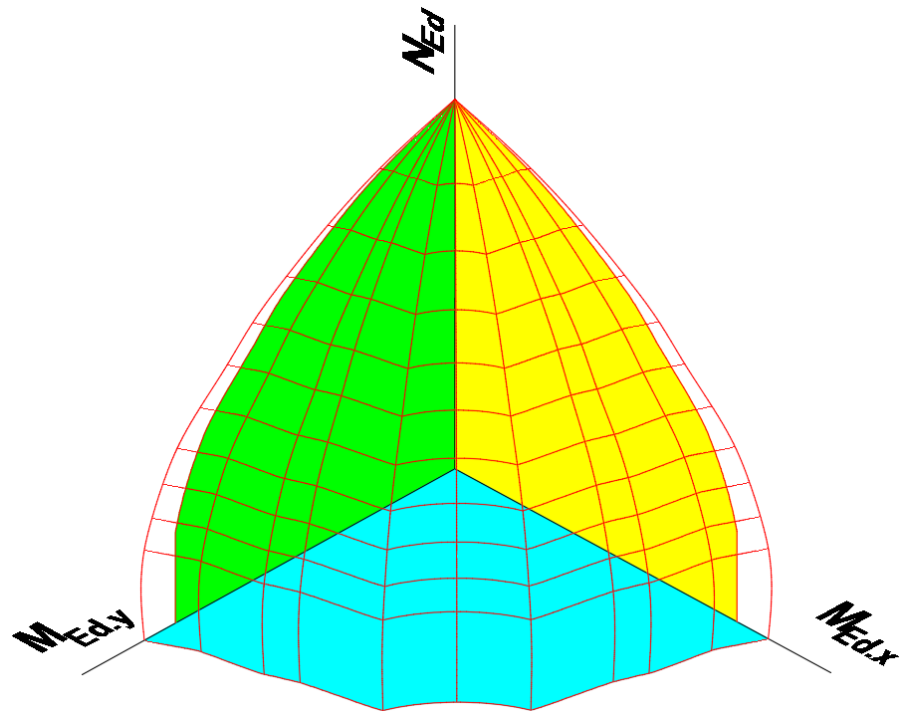
Yhteisvaikutuskuvaajan kuvaus muuttuu kolmiulotteiseksi, kun otetaan huomioon sekä taivutus ja puristus molempien pääakselien suhteen sekä pääakselin samanaikainen taivutus. Kuvissa 4.8, 4.9 ja 4.10 on esitetty kolmen eri liittopilaripoikkileikkauksen kolmiulotteiset yhteisvaikutuskuvaajat normaalilämpötilassa. Liittopilarien poikkileikkaustyytit ovat symmetrisesti raudoitettut neliöprofiili ja pyöröprofiili sekä epäsymmetrisesti raudoitettu suorakaideprofiili kuvien mainitsemisjärjestyksessä. Teräsprofiilin teräslaji on S355.



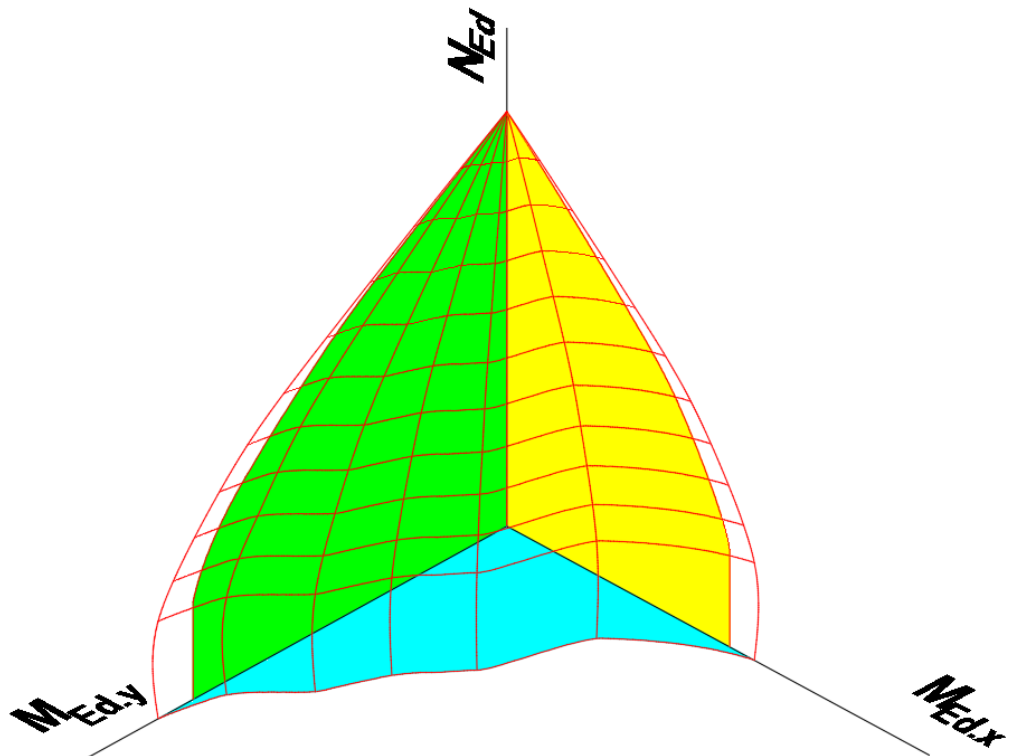
Kuva 4.8 Erään symmetrisen SHS liittopilarin kolmiulotteinen yhteisvaikutuskuvaaja.

Kuvissa 4.8, 4.9 ja 4.10 on esitetty täytetyillä rastereilla kaksiulotteiset yhteisvaikutuskuvaajat eli puristuksen ja taivutuksen rasittaessa liittopilaripoikkileikkausta molempien pääakselien ympäri sekä taivutuksen rasittaessa molempien pääakselin ympäri yhtäaikaista. Lisäksi on laskettu vinon taivutuksen väliarvot tason ($M_{Ed,x}$ $M_{Ed,y}$) suuntaisesti käyttäen puristavan kuormituksen arvona poikkileikkauksen plastisen puristuskestävyyden $N_{pl,Rd}$ ja betonipoikkileikkauksen plastisen puristuskestävyyden $N_{pm,Rd}$ välisiä arvoja yh-

tälön (4.14) mukaan. Muuttujana X käytetään arvoja 0, 0,1...0,9. Selvyyden vuoksi betonipoikkileikkauksen plastinen puristuskestävyys $N_{pm.Rd}$ kuvaa vain betonin puristuskestävyyttä, eikä teräsbetonipoikkileikkauksen.



Kuva 4.9 Erään symmetrisen CHS liittopilarin kolmiulotteinen yhteisvaikutuskuvaaja.



Kuva 4.10 Erään epäsymmetrisesti raudoitettun RHS liittopilarin kolmiulotteinen yhteisvaikutuskuvaaja.

$$N = (N_{pl.Rd} - N_{pm.Rd}) * X + N_{pm.Rd} \quad (4.14)$$

Kolmiulotteiset kuvaajat on muodostettu laskemalla molempien pääakselin suhteen tapahtuvan puristuksen ja taivutuksen sekä vinon taivutuksen yhteisvaikutuskuvaajat. Lisäksi puristetun liittopilarin yhteisvaikutuskäyrät on laskettu kaavan (4.14) puristuskuormilla ja yhteisvaikutuskuvaajaa redusoidtiin puristuksesta aiheutuneen suhteellisten momentin avulla. Jokaisesta yhteisvaikutuskäyrästä saatiin sadan pisteen joukko, joka asetettiin oikealle koordinaattitasolle AutoCad-ohjelmistolla ja yhdistettiin viivaksi approksimaatiolla.

Kohtisuorassa vinon taivutuksen väliarvoihin ovat kuvaajat, jotka myötäilevät niitä vinon taivutuksen yhteisvaikutuskuvaajan taitekohdissa. Tämä on tehty pisteiden approksimaatiolla ja sen tarkoitus on vain selkeyttämään kuvan kolmiulotteisuutta. Approksimaatiossa on pieni virhe, joka näkyy kuvissa vinon taivutuksen kuvaajissa puristuskuormalla $N = 0$ ja $N = N_{pm.Rd}$ välissä siten, että taivutuskestävyys kasvaa suuremmaksi niiden välissä kuin niiden kohdalla ja todellisuudessa taivutuskestävyyden pitäisi olla niiden välissä täysin pystysuora. Tämä johtuu edelleen siitä, että yhteisvaikutuskuvaajat on rajattu siten, että kuvan 4.1 alue BCD ei ole niissä mukana.

Kuvista nähdään selvästi, kuinka α_M -kerroin vaikuttaa liittopilarin yhden pääakselin suhteen tapahtuvan puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutuskuvaajaan, jonka analyttinen muoto on esitetty yhtälössä (4.12). Kertoimen α_M poissa ollessa pääakselien yhteisvaikutuskuvaajan ulkopinta olisi samassa pinnassa kuin approksimaation pinta eli taivutuskestävyys olisi kauttaaltaan 11% suurempi (1/0,9) α_M ollessa 0,9 ja 25% (1/0,8) sen ollessa 0,8. Rasteroimaton kuvaaja koordinaatistoissa $(N_{Ed}, M_{Ed,x})$ ja $(N_{Ed}, M_{Ed,y})$ kuvaavat yhtälön (4.13) tilannetta, jossa pienennyskerrointa ei käytetä. Suhteellinen momentti on 1,0, mikäli kuormitustaso on alle $N_{pm.Rd}$ eli betonipoikkileikkauksen plastisen puristuskestävyyden. Kuormitustason kasvaessa sen yli suhteellisen momentin arvo laskee ja on lukuarvona kyseisen puristuskuorman vaaka-akselin momenttikestävyyden suhde alkuperäiseen momenttikestävyyteen, jota selitettiin edellä esimerkin avulla.

Betoniraudoitusta lisäämällä vinon taivutuksen kestävyys kasvaa enemmän puhtaan vinon taivutuksen alueella. SHS-profiilin tapauksessa esimerkiksi neljällä, symmetrisesti poikkileikkauksen kulmin sijoitetuilla tangoilla plastinen taivutusvastus olisi alkuperäisesti molempien pääakselin suhteen W ja molempien pääakselien suhteen tapahtuvan taivutuksen suunnan resultantin ollessa kiertynyt 10 astetta liittopilarin korkeusakselin ympäri taivutusvastuksen resultantti samaan suuntaan on 1.083W. Kun taivutusresultantin akseli on kiertynyt 22,5 astetta taivutusvastus saa arvon 1.307W ja puhtaan vinon taivutuksen tapauksessa, eli kiertymäkulman ollessa 45 astetta, taivutusvastus on 1.414W. Edellisessä laskelmassa ei ole otettu huomioon kiertymäkulman ollessa 45 astetta, että

taivutusakseli on keskellä raudoitustankoa eli tangon plastinen taivutusvastus ($2r^3/3$) tulisi lisätä arvoon 1.414W, mutta tällöin poikkileikkauksen geometria pitäisi tuntea paremmin eikä se palvelisi tätä esimerkkiä. Laskelma on esitetty yksityiskohtaisesti liitteessä 3.

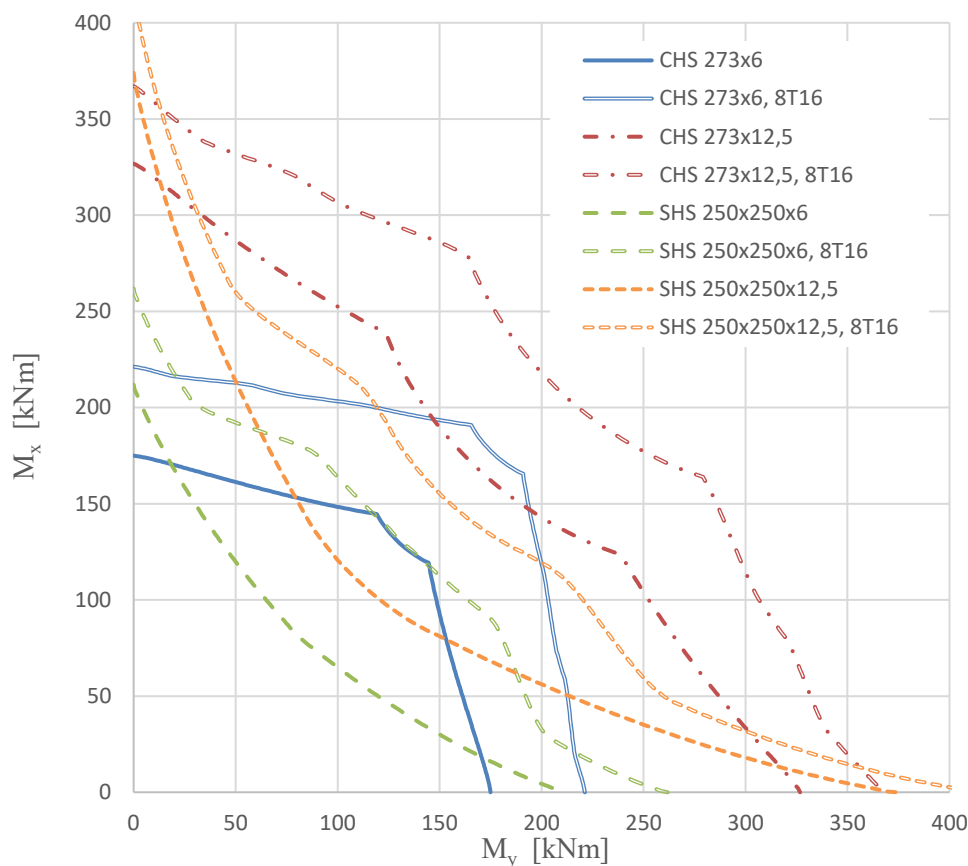
Pyöröprofiililla eli CHS-profiileilla ei välttämättä tarvitset tutkia vinoa taivutusta yhteisvaikutuskuvaajien avulla, sillä se on pyörähdysymmetrinen korkeusakselin ympäri. Ainakin mikäli betoniraudoitusta ei oteta huomioon. Tämän takia vino taivutus voidaan ottaa huomioon suoraan yhdistämällä molempien pääakselien ympäri tapahtuvat taivutukset Pythagoraan lauseella

$$M_{Ed} = \sqrt{M_{Ed,y}^2 + M_{Ed,z}^2} \quad (4.15)$$

ja tutkia poikkileikkausta kuten taivutus olisi vain yhden akselin ympäri. Tarkemmin mietittäessä, pyöreän liittopilaripoikkileikkauksen taivutusjäykkyys on aina vakio, kun tarkastellaan pääakselin kiertymää, jos raudoitustankojen välinen kulma on vakio. Taivutusvastus tosin ei ole vakio, kuten laskennallisesti todetaan liitteessä 3. Laskennassa betoniraudoitustangot sijoitetaan aina pyörähdysymmetrisesti, mutta niitä saatetaan tarvittaessa siirtää, kun suunnittelussa alkaa hahmottua lopullinen liittopilari, jossa on liitososat sekä jatkosraudoitus.

Kuvassa 4.11 on esitetty vinon taivutuksen yhteisvaikutuskuvaajia, kun liittopilaripoikkileikkauksessa on ohut teräsprofiili ilman betoniraudoitusta, paksu teräsprofiili ilman betoniraudoitusta ja samat poikkileikkaukset raudoitettuna sekä pyöreällä että neliönmalisella teräsprofiililla. Kuvassa 4.12 on vastaavat profiilit palotilanteessa R60. Profiilit ovat samat, joita tutkittiin edellä kuvien 4.6 ja 4.7 tapauksissa.

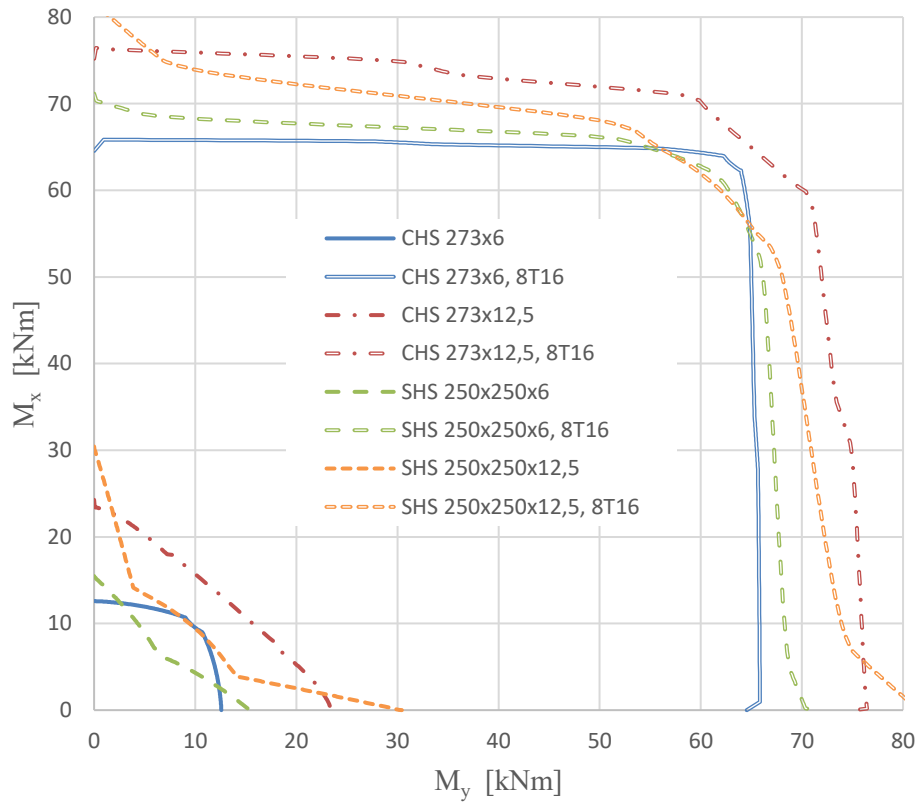
Ilman betoniraudoitusta ohuen neliöprofiilin tuottama vinon taivutuksen yhteisvaikutuskäyrän muoto muistuttaa kolmiota, jonka hypotenuusa on jokseenkin kaareva kohti sivukateetteja. Suuremmalla ainevahvuudella maksimimomenttikestävytydet näyttäisivät kasvavan suhteessa enemmän kuin puhtaan vinon taivutuksen kestävytydet. betonirauditus lisää kestävyyttä puhtaalle vinolle taivutukselle merkittävästi ja niukemmin, mutta kuitenkin selkeästi, pääakselien ympäri tapahtuvalle yhdistetylle puristukselle ja taivutukselle. Pyöröprofiilien tapauksessa raudoittamattoman poikkileikkauksen vinon taivutuskestävyyden kuvaaja on epäsäännöllinen. Aluksi se laskee suoraviivaisesti ja tietyssä pisteessä on epäjatkuvuuskohta, jonka jälkeen sen kulmakerroin laskee äkillisesti ja luonne muuttuu nousevaksi kaarifunktioksi. Funktio jatkuu, kunnes vinon taivutuksen vaikutusakseli on 45 astetta eli kunnes kyseessä on puhdas vino taivutus. Funktiot, kuten muut kuvan 4.11 vinon taivutuksen yhteisvaikutuskuvaajat, ovat peilisymmetrisiä puhtaan taivutuksen suhteen. Raudoituksen lisääminen CHS-profiilille vaikuttaa kasvattamalla kestävyyttä enemmän merkittävästi puhtaalle vinolle taivutukselle ja vähemmän pääakselin ympäri tapahtuvalle taivutukselle, samaan tapaan kuin neliöprofiilien tapauksessa.



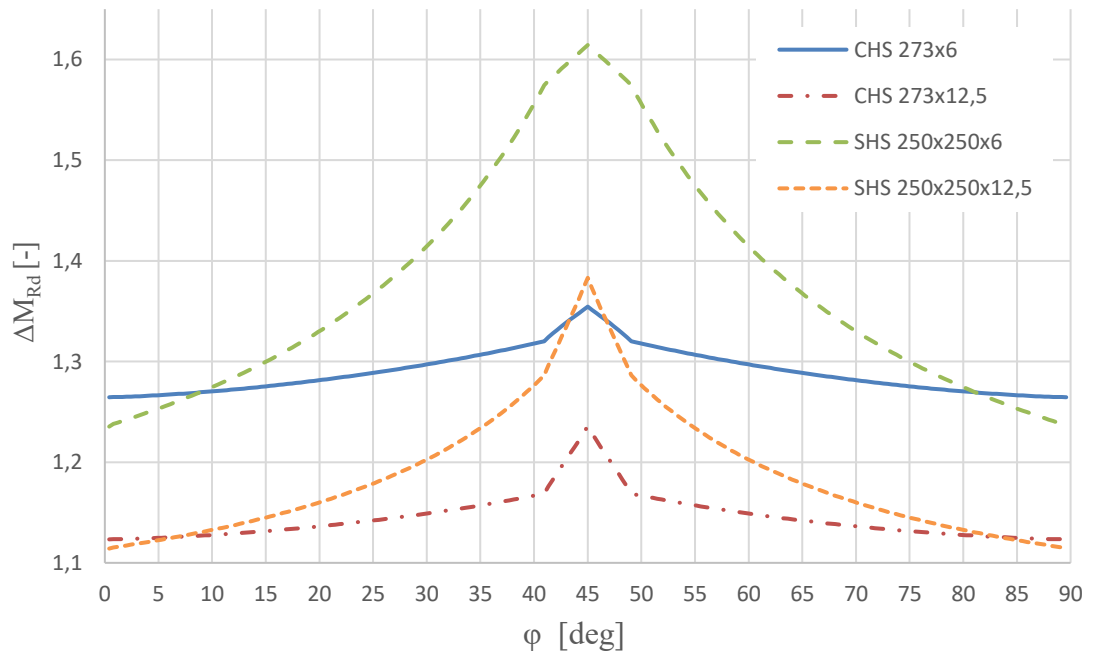
Kuva 4.11 Eräiden liittopilarien vinon taivutuksen yhteisvaikutuskuvaajat, kun kyseessä on normaalilämpötila

Normaalilämpötilassa vinon taivutuksen kestävyyydet kasvavat raudoituksen lisäämisen johdosta pienemmän seinämävahvuuden profiileilla n. 25 % ja suuremmilla reilu 10 % vinon taivutuksen resultantin ollessa kääntynyt vain vähän. Kulman kasvaessa lisäkestävyydet kasvavat suhteessa nopeammin neliöprofiileilla ja puhtaan vinon taivutuksen tilassa kestävyyydet ovat kasvaneet profiililla SHS 250x250x6,0 61 % ja SHS 250x250x12,5 38 %. Profiilin CHS 273x6,0 kasvu on 35 % ja CHS 273x12,5 24 %. Kuvassa 4.13 on kuvattu raudoituksen tuottaman lisäkestävyyden muodostuminen vinon taivutuksen kiertokulman funktiona.

Palotilanteessa R60 teräsprofiilien keskilämpötilat ovat 874 °C ja 896 °C välillä. Rakenneteräksen lujuuden pienennyskerroin on n. 0,065 ja kimmomoduulin pienennyskerroin samaa luokkaa. Teräsprofiilin merkitys on enää vähäinen rakenteellisen kestävyuden näkökulmasta. Liittopilarien vinon taivutuksen kestävyyydet ilman betoniraidoitusta ovat myös hyvin pieniä. Raudoituksen vaikutus taivutuskestävyyksiin on esitetty kuvassa 4.12, josta huomataan, että niiden vaikutus on äärimmäisen selvä. Palotilanteessa raudoitetut poikkileikkaukset kestävät vinoa taivutusta moninkertaisesti raudoittamattomaan nähden, joka huomataan lisäksi kuvasta 4.14.

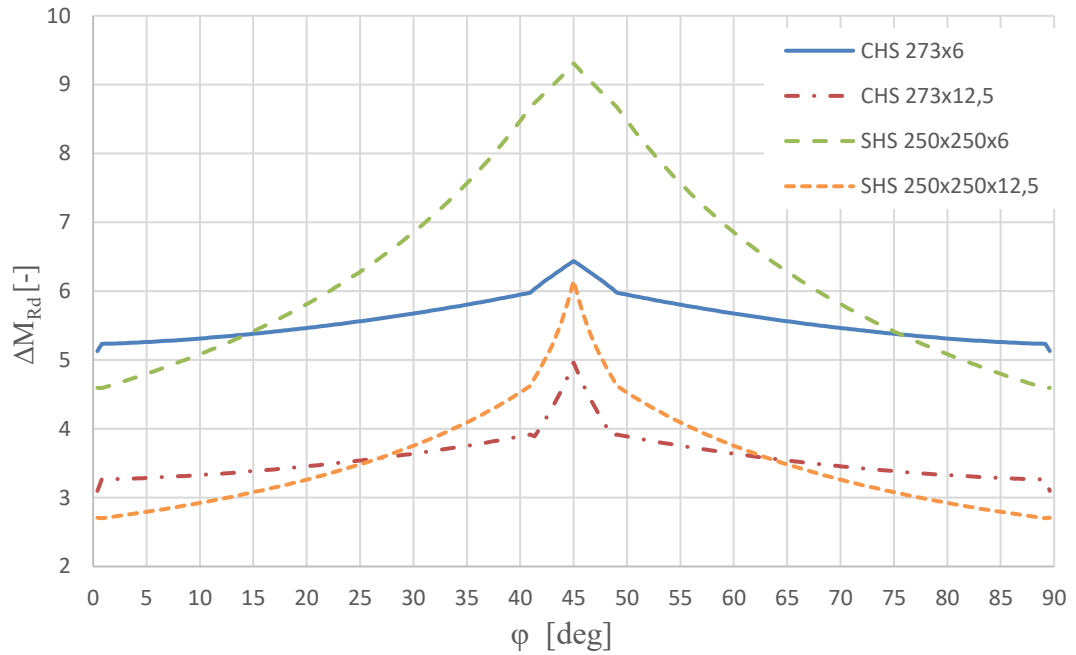


Kuva 4.12 Eräiden liittopilarien vinon taivutuksen yhteisvaikutuskuvaajat palotilanteessa R60.



Kuva 4.13 Raudoituksen vaikutus vinon taivutuksen lisäkestävyyteen kiertokulman funktiona, kun kyseessä on normaalilämpötila.

Profiilin CHS 273x6,0 vinon taivutuksen kestävyys kasvaa 413 % ja profiilin CHS 273x12,5 210 % resultantin ollessa kiertynyt vain vähän. Neliöprofiileilla SHS 250x250x6,0 vastaavat arvot ovat 360 % ja SHS 250x250x12,5 171 %. Puhtaan vinon taivutuksen tapauksessa kestävyysien suhteet raudoitetun ja raudoittamattoman välillä ovat samassa järjestyksessä 544 %, 396 %, 831 % ja 515 %. Kuvassa 4.14 on esitetty vinon taivutuksen lisäkestävyydet kiertoikulman funktiona palotilanteessa R60.



Kuva 4.14 Raudoituksen vaikutus vinon taivutuksen lisäkestävyyteen kiertoikulman funktiona, kun kyseessä on palotilanne R60.

5. MITOITUS

Liittopilarin suunnittelussa, samoin kuin pilarin suunnittelussa yleensä, käytetään osavarmuuskertoimen menetelmää Eurokoodin mukaisessa suunnittelussa. Osavarmuusmenetelmän hyvyttä perustellaan sillä, että varmuutta voidaan kohdistaa enemmän tekijöihin, joihin liittyy suuri epävarmuus, ja vastaavasti vähemmän tekijöihin, joihin liittyy pienempi epävarmuus ja jotka tunnetaan paremmin. Parhaiten tämä näkyy materiaaliosavarmuuskertoimissa betonin ja rakenneteräksen välillä, jossa Suomessa betonille käytettävä materiaaliosavarmuuskertoimen on 1,5 ja rakenneteräkselle (tavanomainen hiiliteräs) 1,0. Ruostumattomalle teräkselle materiaaliosavarmuuskertoimeksi on hiiliteräksestä poiketen ilmoitettu 1,1. Taulukossa 5.1 on esitetty tämän työn kannalta oleelliset materiaaliosavarmuuskertoimet betonille, betoniteräkselle ja rakenneteräkselle normaali- ja palotilanteessa. [2]

Taulukko 5.1 Mitoituksessa käytettävät materiaaliosavarmuuskertoimet, jotka ovat kansallisesti valittu. [10][19][22][23][26]

| | γ_M | $\gamma_{M,fi}$ |
|-------------------|------------|-----------------|
| Betoni | 1,5 | 1,0 |
| Hiiliteräs | 1,0 | 1,0 |
| Betoniteräs | 1,15 | 1,0 |
| Ruostumaton teräs | 1,1 | 1,0 |

SFS-EN 1992-1-2 määrittää betonin materiaaliosavarmuuskertoimeksi onnettomuustilanteessa 1,2. SFS-EN 1992-1-2 kohdassa 2.3(2)P ehdottaa materiaalivarmuuskertoimeksi tulipalon osalta 1,0 ja Suomen kansallinen liite vahvistaa sen. Palotilanteessa kaikki materiaaliosavarmuuskertoimet ovat ykkösen suuruisia. Itseasiassa myös kuormien osavarmuuskertoimet ovat yksikköjä ja lisäksi hyötykuormia kerrotaan pienennyskertoimilla, joita kutsutaan yhdistelykertoimiksi, ja joiden arvo on pienempi kuin 1,0. [2][7][22]

Kuormien yhdistelykertoimet ovat esitetty SFS-EN 1990 kansallisessa liitteessä taulukossa A1.1. SFS-EN 1991-1-2 Suomen kansallisen liitteen mukaan määräävänä muuttuvaa kuorman kertoimena käytetään ψ_2 , mikäli se ei ole luonnonkuorma eli tuuli-, lumitai jääkuorma. Luonnonkuorman tapauksessa käytetään kerrointa ψ_1 . Eurokoodi antaa kuormien laskentaan myös yksinkertaistetun vakioarvon, joka on

$$\eta_{fi} = 0,65. \quad (5.1)$$

Kuitenkin määräävän kuormaluokan ollessa E (varasto- ja teollisuustilat) käytetään

$$\eta_{fi} = 0,7. [12][20][24] \quad (5.2)$$

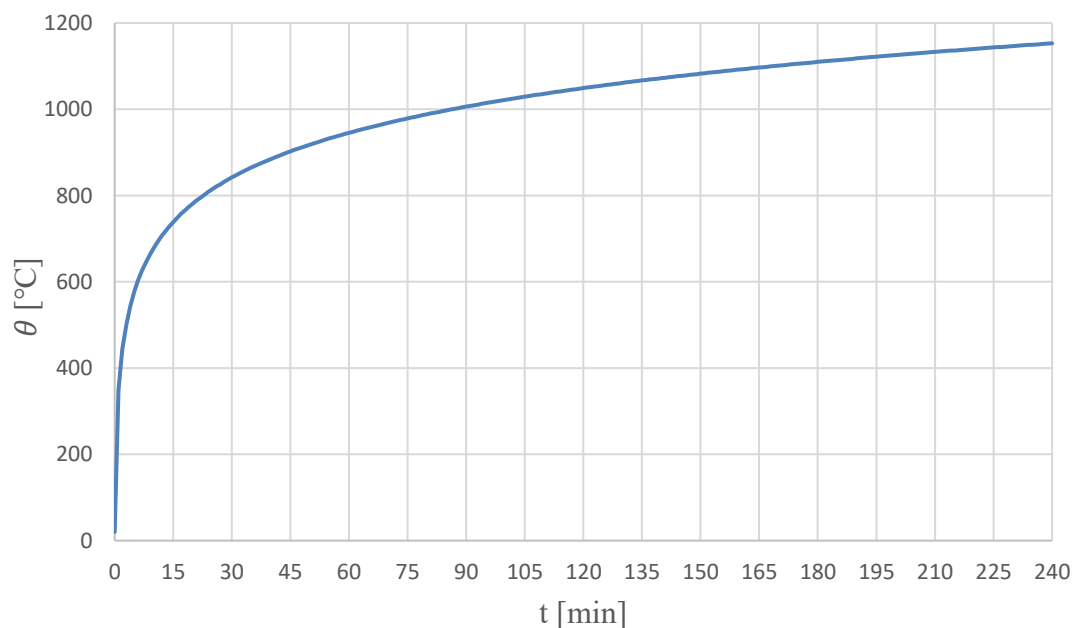
5.1 Palotilan lämpötila

Suunnittelussa liittopilarin lämpötila on palon alkaessa yleensä 20 °C. Palon edetessä liittopilarin teräsprofiili lämpenee hyvin nopeasti ja sitä voidaan pitää vakio lämpötilassa kauttaaltaan, joka aiheutuu teräksen korkeasta lämmönjohtavuudesta. Betoni kuumenee paljon hitaammin sen verrattain suuren lämpökapasiteetin ja pienen lämmönjohtavuuden ansiosta. Teräksen lämmönjohtavuus on noin 25-kertainen ja lämpökapasiteetti noin puolet betoniin nähden. Lisäksi betonin massa on monikertainen teräkseen nähden. Liittopilarin palonkestävyys perustuu juuri betonin hitaaseen lämpenemiseen ja sitä kautta se säilyttää lujuutensa ja jäykkyytensä kauemmin kuin tavanomainen teräspilari erityisesti silloin, kun betoni on raudoitettu oikealla tavalla. Betonin sisällä oleva betonirauditus oletetaan olevan samassa lämpötilassa, kuin niitä ympäröivä betoni.

Eurokoodin SFS-EN 1994-1-2 mukaan ilman tarkempaa selvitystä, käytetään palotilan lämpötilan ja palon pituuden suhteena standardipaloa, joka on esitetty standardissa ISO-834. Palotilan kaasun lämpötila on

$$\theta = 20 + 345 \log(8t + 1), \quad (5.3)$$

jossa θ on lämpötila asteina celsiusta ja t on aika minuutteina. Kuvassa 5.1 on esitetty ISO-834 mukainen palotilan kaasun lämpötila-aikakäyrä. [12]



Kuva 5.1 Standardipalon lämpötila-aikakäyrä.

Standardipalo ei ota huomioon palotilan mittoja eikä palotilassa olevaa mahdollista palavaa materiaalia tai että palava materiaali loppuu aikanaan, jolloin lämpötilan nouseminen pysähtyy. Tätä monesti kritisoidaankin, kun palomitoitus tehdään esimerkiksi ulkona sijaitsevalle rakenteelle tai rakennukselle. Eurokoodit ja viranomaistahot jättävät mahdollisuuden palomitoitukseen myös muulla kuin standardipalon menetelmällä, mikäli halutaan tarkemmin selvittää palon kulku ja lämpötilan kehittyminen.

Lämpötilan arvioimiseen voidaan käyttää muitakin menetelmiä. Paloa voidaan simuloida tietokoneella, jossa otetaan huomioon mm. palavan materiaalin määrä ja palotilan dimensiot. Simulaatiot yleistyvät koko ajan, koska niiden avulla voidaan säästää merkittävä määrä kustannuksista. Esimerkiksi korkean liikuntahallirakennuksen teräksiset kattoristikot, jotka pitäisi yleensä mitoittaa vähintään R60 paloluokkaan voidaan mitoittaa simulaation tuloksien perusteella esimerkiksi paloluokkaan R30. Simulaatio ottaa huomioon, että palotilassa esimerkiksi liikuntakeskuksen salibandykentällä ei ole merkittävää palokuormaa, joka kykenisi ylläpitämään paloa tunnin ajan. Kattopalkkien lämpötila ei nouse palon säteilystä samalle tasolle kuin lattiatasolla, jossa liekit sijaitsevat. Tällainen on optimaalinen tilanne, jossa lämpötilan tarkka kehittyminen kannattaa selvittää. Vaikka palosimulaatiot ovat yleistymässä, ovat ne silti tavallisessa projektissa harvinaisia. Ne ovat kalliita sekä aikaa vieviä ja niiden avulla syntyvät mahdolliset säästöt pitää olla merkittävät. Lisäksi myös tilaaja on vakuutettava mahdollisista säästöistä.

Palotilan lämpötila voidaan lisäksi määrittää erilaisilla polttokokeilla, mutta ne ovat varsin harvinaisia. Tavallisessa suunnittelussa polttokokeita ei tehdä, vaikka Eurokoodi antaa sille mahdollisuuden. Myös kaupalliset yritykset tekevät tai rahoittavat polttokokeita saadakseen tyyppihyväksynnän tai muuta tietoa tuotteistaan.

5.2 Liittopilaripoikkileikkauksen lämpötila

Betonilla täytetyissä teräsputkiprofiileissa lämpörasitus kohdistuu teräsprofiiliin, joka suojaa liittopilarin betoniydintä. Lämpö siirtyy teräsprofiilin ulkopintaan säteilemällä palotilassa ja konvektiolla eli kuljettumalla kaasusta. Teräsprofiilin sisäpinnan ja betonin ulkopinnan välillä lämpö siirtyy konduktiolla eli johtumalla. SFS-EN 1991-1-2 mukaan konvektion lämmönsiirtokertoimenä voidaan käyttää standardipalossa arvoa $\alpha_c = 25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ [12]. Teräsprofiiliin muodostuva nettolämpövuoto konvektiosta on

$$\dot{h}_{net.c} = \alpha_c(\theta_g - \theta_m). \quad (5.4)$$

missä θ_g on kaasun lämpötila ja

θ_m on rakenneosan pinnan lämpötila.

Säteilyllä siirtyvä nettolämpövuoto on

$$\dot{h}_{net.r} = \Phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma * [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (5.5)$$

missä Φ on näkyvyyskerroin,

ε_m on rakenneosan emissiivisyys,

ε_f on palon säteilykerroin,

σ on Stefan-Boltzmann -vakio ja

θ_r on paloympäristön tehollinen säteilylämpötila.

Kokonaisnettolämpövuoto on konvektiolla ja säteilemällä siirtyvien nettolämpövöiden summa

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net.c} + \dot{h}_{net.r}. \quad [24] \quad (5.6)$$

SFS-EN 1991-1-2 mukaan näkyvyyskertoimen ja palon säteilykertoimen voidaan käyttää arvoa 1,0. Materiaalin emissiivisyys eli säteilykerroin kuvaa materiaalin pinnan kykyä lähettää lämpösäteilyä. Lämpösäteily, jota pinta ei lähetä eteenpäin, jää materiaalin pintaan. Emissiivisyyden arvo on välillä 0 ja 1 ja se määritetään suhteena ideaali mustan kappaleen lähettämään lämpösäteilyyn. Emissiivisyyden arvo on aina alle 1. Pinnan väri ei vaikuta emissiivisyyteen, mutta epäpuhtaudet kasvattavat sitä. Hiiliteräkselle käytetään emissiivisyyden arvoa 0,7 ja ruostumattomalle teräkselle arvoa 0,4. [12][24]

Teräksien emissiivisyyksiä on tutkittu ainakin VTT:llä [15] tutkimuksessa, josta artikkeli ”Steel emissivity at high temperatures” on kirjoitettu. Siinä todetaan, että hiiliteräs emissiivisyys on 0,2 300 °C asti ja nousee tasolle 0,65 ... 0,70 välillä 300 ... 500 °C. Tähän reflektoidessa mitoitusstandardin arvo 0,7 on sopiva. Samassa tutkimuksessa tutkittiin emissiivisyyden arvoa ruostumattomalle teräkselle ja siinä tutkimus tehtiin kahdelle erilaiselle pinnalle. Ensimmäisen pinta oli kevyesti harjattu ja toisen pinta oli puhdistettu hyvin huolellisesti. Näistä ensimmäinen kuvaa todellisuutta paremmin. Kevyesti harjattulle pinnalle saatiin emissiivisyyden vaihteluväliksi 0,25 ja 0,35 ja huolellisesti puhdistetulle pinnalle saatiin vaihteluväliksi 0,2 ... 0,3. Ruostumattoman teräksen emissiivisyyden mitoitusarvo on tämän perusteella hieman konservatiivinen. Emissiivisyys vaikuttaa merkittävästi koko liittopilaripoikkileikkauksen lämpötiloihin ja varsinkin ruostumattomilla teräksien, joiden suunnittelussa pieni emissiivisyys on merkittävä etu mitoituksen näkökulmasta. [15]

Teräsprofiililla ja sen sisällä olevalla betonilla on erilaiset muodonmuutosominaisuudet lämpötilan noustessa. Palotilanteessa teräsprofiilin sisäpinnan ja betonin ulkopinnan välille muodostuu rako, jonka jälkeen lämpötila siirtyy teräsosan ja betoniosan välillä säteilemällä ja kuljettumalla. Ilmiö aiheuttaa betonipoikkileikkauksen ulkopinnalle pienemmän kokonaislämpövuon kuin, että teräsprofiili ja betoni olisivat ideaalikontaktissa. Pintojen välisiä lämpövastuksia on tutkittu lähteessä [17]. Teräsprofiilin sisäpinnan ja betonipoikkileikkauksen ulkopinnan välissä ideaalikontakti tuottaa konservatiivisia lämpötiloja. Kirjallisuudessa [21] todetaan, että lämpövastuksen $200 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ käyttö tuottaisi realistisen betonipoikkileikkauksen lämpötilan. Vaihtoehtoisesti materiaalien välinen kontakti voidaan ottaa huomioon mahdollisimman realistisesti kitkakontaktilla, jossa lämpötilan kehittyessä betoni irtaantuu teräsprofiilista. Raon suuruuden arvioiminen on kuitenkin haasteellista ja se riippuu pilarin poikkileikkauksesta ja betonin sekä teräksen lämpötiloista. Kirjallisuudessa siinä on usein käytetty arvoa 1 mm käytännöllisistä syistä, sillä monet laskentaohjelmistot toimivat minimissään millimetrin tarkkuudella.

Liittopilarin lämpökenttien ratkaiseminen on haastavaa. Ongelman yksityiskohtainen ratkaiseminen on monimutkainen prosessi ja siinä tulee ottaa huomioon mm. betonin kosteuskehitys, Fourierin laki ja Fickin lait. Lämpöyhtälö voidaan kirjoittaa approksimaationa ottaen huomioon materiaalien lämmönjohtavuudet, lämmönsiirtymisen suunta lämpögradientin avulla ja energian säilymisperiaatteen mukaan seuraavasti XYZ-koordinaatistossa:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \dot{h}_{net}, \quad (5.7)$$

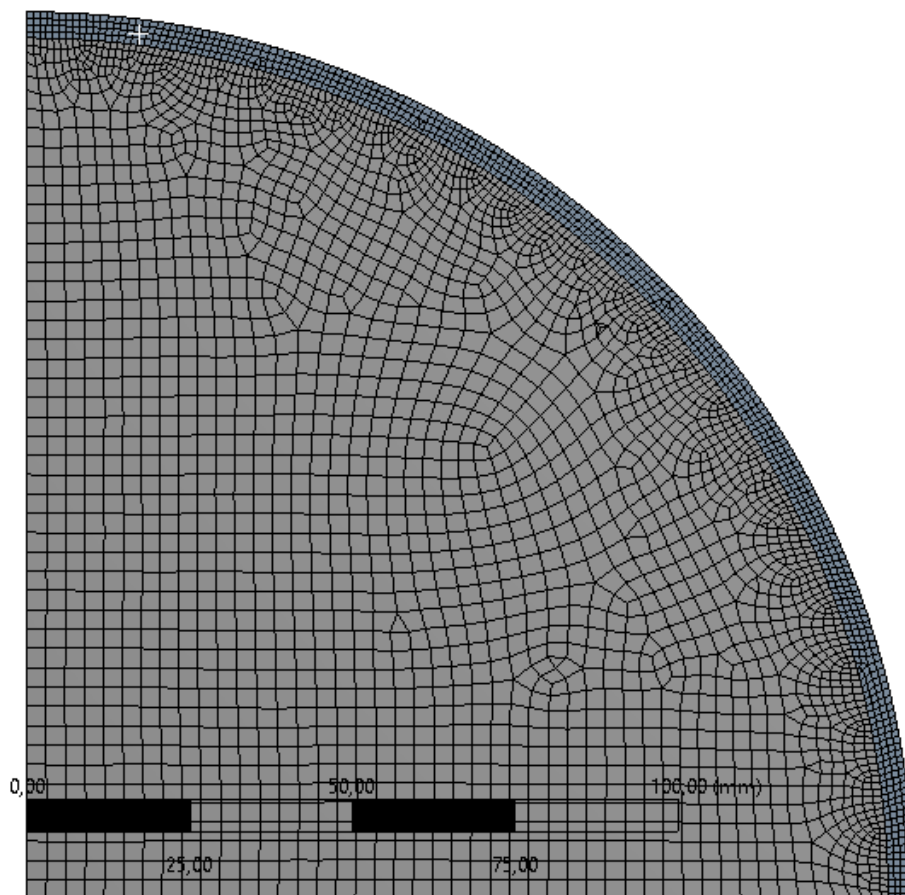
missä ρ on materiaalin tiheys ja

t on aika.

Osittaisdifferentiaaliyhtälön ratkaiseminen siten, että se toimii teräsprofiilin ulkopinnalta betonin keskipisteeseen, on hankalaa ja tässä työssä lämpötilakentät lasketaan elementtimenetelmään perustuvalla laskentaohjelmistolla ANSYS. [16]

Liittopilarin lämpötilakentät muodostetaan laskentaohjelmistolla ANSYS lyhytaikaislämpötila-analyysillä (Transient Thermal) kaksiulotteiselle poikkileikkaukselle, jossa hyödynnetään liittopilaripoikkileikkauksen kaksoissymmetriaa. Aluksi suoritetaan muutama herkkyysanalyysi, joiden avulla optimoidaan laskentaan kuluva aika ja poikkileikkauksen lämpötilan tarkkuustaso. Herkkyysanalyysi suoritetaan varioimalla aika-askelta (time step) sekä elementtijakoa poikkileikkaukselle CHS 273x4,0 paloluokilla R15, R60 ja R240. Aluksi lasketaan tarkka vertailuarvo ja parametreina käytetään elementtikokoa 3 mm ja aika-askelta 1 s . Elementtien kappalemäärä on 3012 ja laskentaan kuluu aikaa noin 1600 sekuntia. Poikkileikkauksen symmetria-akseleille asetetaan lämpötilaseuranta

ja pisteiden määräksi valitaan sata kappaletta betonille ja kolme teräsprofiilille tasavälein, siten että teräsprofiilille saadaan sisä- ja ulkopinnan lämpötila ja profiilin keskellä vallitseva lämpötila. Molempien akseleiden lämpötila on identtiset, kuten alkuhypoteesi oletti. Kuvassa 5.2 on esitetty käytetty poikkileikkaus ja elementtijakauma.



Kuva 5.2 Poikkileikkaus CHS 273x4,0, jolle herkkyysanalyysi suoritetaan.

Seuraavaksi laskenta suoritetaan uudelleen käyttäen aika-askeleena suurempia arvoja 5 s, 10 s, 30 s ja 60 s. Aika-askeleen suurentaminen vaikuttaa betonipoikkileikkauksen sisälämpötiloihin ja eroavaisuudet muuttuvat merkittävimmiten, kun lähestytään poikkileikkauksen keskipistettä. Lyhyellä R15 paloluokan tilanteessa lämpötilan virhe on suurin poikkileikkauksen halkaisijan neljänneksen pituudella keskipisteestä. Aika-askeleella 5 s syntyvä virhe ovat kyseissä kohdassa 0,71 %. Poikkileikkauksen keskipisteessä virhe on 0,26 % ja betonipoikkileikkauksen ulkopinnassa alle -0,07 %. Lisäksi teräsprofiilissa lämpötilan virhe on alle -0,07 % ja on lähes vakio kaikissa kolmessa mittauspisteessä. Ulkopinnassa virhe on maltillinen, mutta mitoituksen näkökulmasta väärään suuntaan, sillä se tuottaa teräsprofiilille liian optimistisia lämpötiloja. Aika-askeleella 10 s virheet vastaavissa kohdissa ovat samassa järjestyksessä 1,63 %, 0,61 %, -0,15 % ja -0,15 %. Selkeää linjaa on vaikea lausua näistä mittaustuloksista, mutta tulokset osoittavat varmuudella, että virheen prosentuaalinen osuus kasvaa merkittävästi aika-askelta pidentäessä. Taulukossa 5.2 on esitetty herkkyysanalyysin tulokset, kun aika-askelta varioidaan kolmella paloluokalla.

Taulukko 5.2 Elementtimenetelmän herkkyyssanalyysin tulokset, kun aika-askelta varioidaan ja elementtiverkotus on vakio. Positiiviset arvot kuvaavat konservatiivista virhettä eli mitoituksen kannalta varmalla puolella olevaa lämpötilaa. Mitta d kuvaa etäisyyttä poikkileikkauksen keskipisteestä. Elementtimäärä on 3259 kappaletta.

| | | d [mm] | TS=5 | TS=10 | TS=30 | TS=60 |
|------|----------|--------|-------|-------|-------|-------|
| R15 | Betoni | 0 | 0,26 | 0,61 | 2,06 | 4,39 |
| | | 26,5 | 0,42 | 0,97 | 3,17 | 6,38 |
| | | 53 | 0,71 | 1,63 | 5,25 | 9,65 |
| | | 79,5 | 0,58 | 1,36 | 4,51 | 7,26 |
| | | 106 | 0,22 | 0,54 | 1,97 | 2,47 |
| | Kontakti | 132,5 | -0,07 | -0,15 | -0,33 | 0,21 |
| | Teräs | 134,5 | -0,07 | -0,15 | -0,34 | 0,21 |
| | | 136,5 | -0,07 | -0,15 | -0,34 | 0,21 |
| R60 | Betoni | 0 | 0,18 | 0,42 | 1,35 | 2,31 |
| | | 26,5 | 0,16 | 0,37 | 1,20 | 2,03 |
| | | 53 | 0,11 | 0,26 | 0,84 | 1,40 |
| | | 79,5 | 0,06 | 0,14 | 0,45 | 0,73 |
| | | 106 | 0,02 | 0,04 | 0,14 | 0,19 |
| | Kontakti | 132,5 | 0,00 | -0,01 | -0,02 | -0,05 |
| | Teräs | 134,5 | 0,00 | -0,01 | -0,02 | -0,04 |
| | | 136,5 | 0,00 | -0,01 | -0,02 | -0,04 |
| R240 | Betoni | 0 | 0,01 | 0,03 | 0,08 | 0,13 |
| | | 26,5 | 0,01 | 0,02 | 0,07 | 0,12 |
| | | 53 | 0,01 | 0,02 | 0,06 | 0,09 |
| | | 79,5 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,05 |
| | | 106 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Kontakti | 132,5 | 0,30 | 0,39 | 0,46 | 0,48 |
| | Teräs | 134,5 | 0,25 | 0,31 | 0,36 | 0,38 |
| | | 136,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Paloluokan R60 tilanteessa virheen määrä on pienempi ja selvästi kaavamaisempi kaikilla aika-askelen varioiduilla. Virheen määrä on poikkileikkauksen keskipisteessä suurimmillaan ja laskee nollaan tai lähes nollaan teräsprofiilin ulkopinnalle. Aika-askelen 5 s lämpötilan virhe on poikkileikkauksen keskellä 0,18 %, betonin ja teräsprofiilin liitoskohdassa ei mainittavaa virhettä ole eikä myöskään teräsprofiilissa. Aika-askeleella 60 s lämpötilan virhe betonin keskipisteessä 2,31 % ja betonin ja teräsprofiilin liittymäkohdassa -0,05 %. Teräsprofiilissa lämpötilan virhe on -0,04 %. On huomautettava, että kaksi viimeiseksi mainittua virhettä ovat mitoituksen näkökulmasta epävarmalla puolella eli teräsprofiili olisi laskennassa liian kylmä, mikäli näitä arvoja käytettäisiin. Toisaalta tämä virhe on hyväksyttävissä, sillä se on maltillinen ja ottaen huomioon teräsprofiilin niukan rakenteellisen hyödyn palotilanteessa, on kyseessä merkitykseltään vähäinen yksityiskohta. Neljän tunnin palotilanteessa R240 lämpötilavirheet ovat pieniä ja sijoittuvat lähinnä teräsprofiiliin, jolla ei ole suurta merkitystä.

Varioimalla elementtiverkon tarkkuustasoa on vain vähän merkitystä lämpötilojen prosentuaalisiin virheisiin. Elementtiverkon tihentäminen aiheuttaa vähäisen tarkkuustason

kasvamisen ja se tapahtuu lyhyillä palonkestoajoilla. Elementtiverkolla, jossa on 1970 elementtiä, betonipoikkileikkauksen lämpötilan virhe on luokassa R15 itseisarvoltaan suurimmillaan 0,72 % ja se sijoittui betonipoikkileikkauksen halkaisijan neljännekseen keskipisteestä. Pienimillään virhe on betonin ja teräsprofiilin liitoskohdassa ja sen suuruus on -0,08 %. Betonin keskipisteessä virhe on 0,27 % Teräsprofiilin lämpötilavirhe on -0,08 %. Karheammalla elementtiverkolla virheen suuruus pysyy samalla tasolla betonipoikkileikkauksessa, mutta virhe kasvaa teräsprofiilissa ja sen läheisyydessä. Muilla paloluokilla virheen suuruus on vähäinen. Taulukossa 5.3 on elementtiverkosta aiheutuvat lämpötilojen virheet samaan tapaan kuin aika-askelta varioidessa taulukossa 5.2.

Taulukko 5.3 Elementtimenetelmän herkkyyssanalyysin tulokset, kun elementtiverkkoa varioidaan ja aika-askel on vakio. Positiiviset arvot kuvaavat konservatiivista virhettä. Mitta d kuvaa etäisyyttä poikkileikkauksen keskipisteestä. Aika-askel on 5 sekuntia.

| | | d [mm] | E=1970 | E=1119 | E=638 | E=149 |
|------|----------|--------|--------|--------|-------|-------|
| R15 | Betoni | 0 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,28 |
| | | 26,5 | 0,42 | 0,42 | 0,43 | 0,45 |
| | | 53 | 0,72 | 0,72 | 0,75 | 0,83 |
| | | 79,5 | 0,60 | 0,59 | 0,63 | 0,68 |
| | | 106 | 0,24 | 0,27 | 0,31 | 0,61 |
| | Kontakti | 132,5 | -0,08 | -0,08 | -0,14 | -0,46 |
| | Teräs | 134,5 | -0,08 | -0,08 | -0,14 | -0,46 |
| R60 | Betoni | 0 | 0,19 | 0,18 | 0,20 | 0,21 |
| | | 26,5 | 0,17 | 0,16 | 0,18 | 0,20 |
| | | 53 | 0,12 | 0,11 | 0,13 | 0,17 |
| | | 79,5 | 0,07 | 0,06 | 0,09 | 0,18 |
| | | 106 | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,34 |
| | Kontakti | 132,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| | Teräs | 134,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| R240 | Betoni | 0 | 0,01 | 0,03 | 0,08 | 0,13 |
| | | 26,5 | 0,01 | 0,02 | 0,07 | 0,12 |
| | | 53 | 0,01 | 0,02 | 0,06 | 0,09 |
| | | 79,5 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,05 |
| | | 106 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| | Kontakti | 132,5 | 0,30 | 0,39 | 0,46 | 0,48 |
| | Teräs | 134,5 | 0,25 | 0,31 | 0,36 | 0,38 |
| | | 136,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Herkkyyssanalyysin tuloksena päädytään lämpötila-analyysissä käyttämään aika-askelena 5 sekuntia ja elementtiverkkoasetusta, jolla tämän profiilin tapauksessa elementtimäärä on 149. Erisuuruisilla profileilla elementtimäärä on luonnollisesti eri.

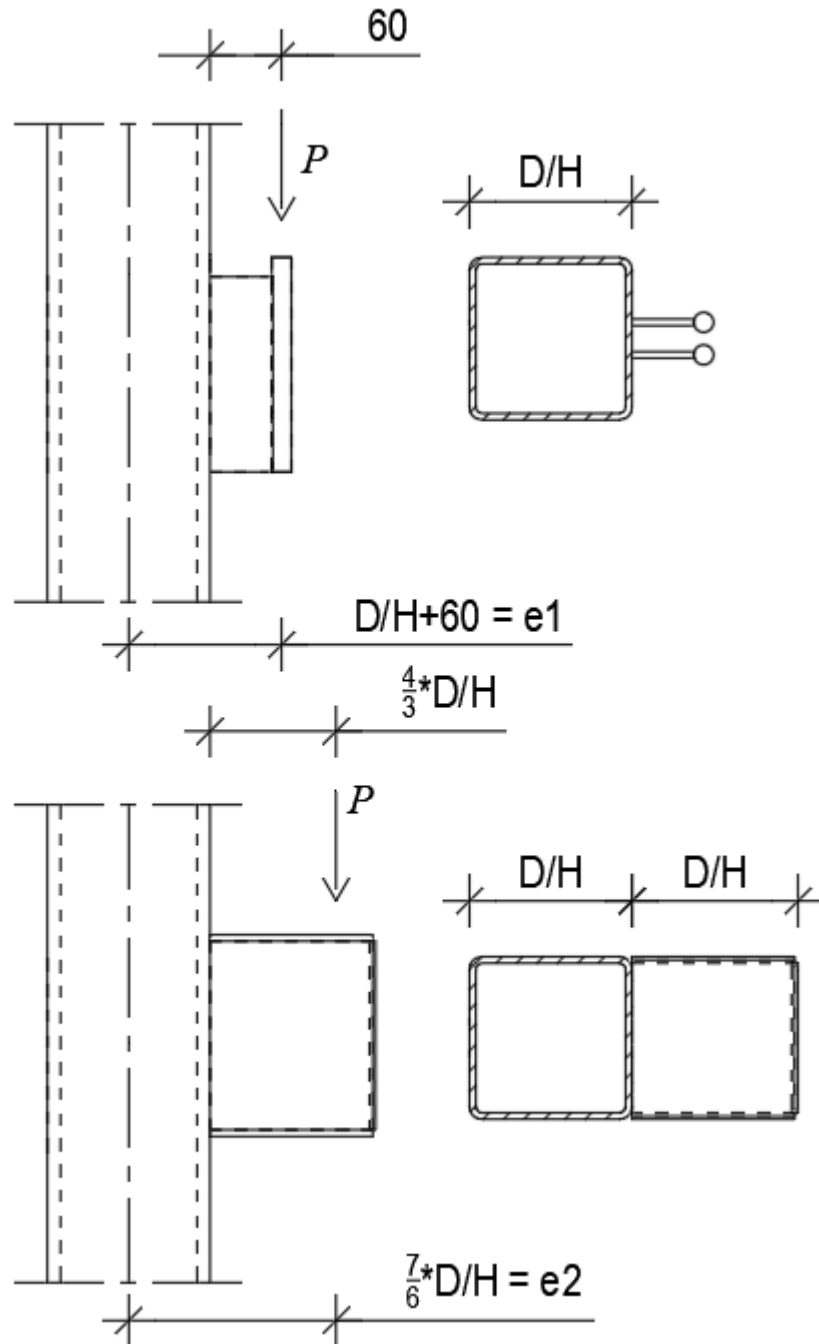
6. KESTÄVYYKSIEN VERTAILU ERI TERÄSLAJEILLA

Liittopilaripoikkileikkauksien kestävyyslaskelmat tehdään standardin SFS-EN 1994-1-1 ja SFS-EN 1994-1-2 mukaan ottamalla huomioon vastaavien Suomen kansallisten liitteiden vaatimukset ja lisäehdot. Laskennassa otetaan huomioon pilarin lokaalit epätäydellisyydet, kuten pilarin vinous ja käyryys. Pilarit käsitellään yksittäisinä rakennusosina ja globaaleja epätarkkuuksia kuten koko rakennusrungon vinoutta ja taipumasta tai siirtymästä aiheutuvia lisärasituksia (P-Delta-analyysi) ei oteta huomioon. Liittopilaripoikkileikkauksen puristus- ja taivutusmomenttien kestävyysarvot lasketaan käyttäen Eurokoodin yksinkertaistettua laskentamenetelmää, joka on esitetty yksityiskohtaisemmin edellä kohdassa 4.1 ja Eurokoodin esistandardissa SFS-ENV 1994-1-1. Erityishuomioina on kerrottava, että yksinkertaistettu laskentamenetelmä sallii laskennan palotilanteessa vain sivusiirtymättömälle rakenteelle. [2][3][12]

Liittopilaripoikkileikkauksen kestävyuden määrää yleensä palotilanne. Palotilanteessa on harvoin laskennallista taivutusmomenttia ja mikäli on, niin se pystytään usein siirtämään kohdassa 2.1 esitetyllä tavalla. Poikkeuksena on törmäys, jossa vaakakuormitus vaikuttaa kerrosvälin keskialueelle ja sitä ei ole mahdollista siirtää. Esimerkiksi ajoneuvon törmäys palotilanteessa on hyvin epätodennäköinen tapahtuma, mutta koska ne eivät ole toisistaan täysin riippumattomia tapahtumia, ne on tarpeen mukaan otettava huomioon samanaikaisesti. Mutta kahden toisistaan riippumattomasti alkunsa saaneen tulipalon aiheutuminen samaan rakennukseen, on niin epätodennäköistä, että sitä ei tarvitse ottaa huomioon.

Kestävyysvertailu suoritetaan kolmella erilaisella liittostyypillä. Ensimmäisenä tilanne, jossa monikerrospilarin yläpohja- ja välipohjaliitokset ovat symmetrisiä siten että kuormien epätasaisuudesta ei muodostu taivutusmomenttia. Toisessa ja kolmannessa tilanteessa on monikerrospilari rakennuksen reunalla ja väli- sekä yläpohjan kuormat siirtyvät palkilta pilarille konsolin avulla, jolloin kuormituksen epäkeskeisyydestä aiheutuu taivutusmomentti. Toisessa tilanteessa kyseessä on puukkokonsoli ja epäkeskeisyyden määrä arvataan olevan puolet liittopilarin halkaisijasta, johon lisätään 60 mm. Kolmannessa tapauksessa kyseessä on merkittäville puristuskuormille tarkoitettu raudoitettu suorakaidekonsoli, jonka leveys ja paksuus ovat yhtä suuret kuin pilarin halkaisija tai leveys. Kuorman oletetaan muodostuvan konsolin pituudelle siten, että pilarin seinämästä katsottuna ensimmäinen kolmannes on kuormittamaton ja seuraavat kaksi kolmannesta on tasaisesti kuormitettu. Kuorman resultantti on kahden kolmannoksen päässä pilarin reunasta eli kokonaisepäkeskeisyys on puolet pilarin halkaisijasta tai leveydestä summattuna kaksi kolmannesta halkaisijasta tai leveydestä eli yhteensä $7/6 d$ tai $7/6 h$. Epäkeskeisyydestä aiheu-

tuvat momentit otetaan huomioon palotilanteessa redusoituina kohdassa 2.1 kuvatulla tavalla ja lisäksi otetaan huomioon pilarin toisen kertaluvun vaikutuksista aiheutuva taivutusmomentti. Liitostyypit, joista muodostuu epäkeskisyyttä, on esitetty kuvassa 6.1.



Kuva 6.1 Laskennassa käytettävät liitostyypit.

Monikerrospilarin poikkileikkaus on vakio joka kerroksessa. Laskelmat suoritetaan rasi-tetuimmalle eli alimmalle pilarille. Tarkoituksena on selvittää liittopilaripoikkileikkauksen suurin kestävyys, jolloin yksinkertaistukseksi valitaan mitoitustilanteeksi yksittäinen ns. koulutehtäväpilari ja puristuskuorma muodostuu yhden kerroksen kautta. Tämän

avulla kuormitusta voidaan kasvattaa lineaarisesti, kunnes normaalivoiman ja taivutusmomentin yhdistelmä törmää yhteisvaikutuskuvaajan reunaan. Nurjahduspituuksina käytetään normaalilämpötilassa arvoa 1,0 ja palotilanteessa 0,7 ja perustelut käytölle on esitetty kappaleessa 2.3. Momentti otetaan huomioon pilarin ylä- ja alapäässä erikseen. Momentin jakautumisena käytetään kuvan 2.1 tapausta, jossa tasaista kuormitusta ei ole ja pisteessä B on pistemomentti. Täten normaalilämpötilassa pilarille, joka on kerrosvälissä AB, muodostuu yläpäähän $M_{YP} = -0,536 \cdot Pe$ suuruinen taivutusmomentti ja alapäähän $M_{AP} = 0,268 \cdot Pe$. Ylä- ja alapään taivutusmomentin suhde on itseasiassa $M_{YP} = -2M_{AP}$. Taivutusjäykkyyden suhdetta normaalilämpötilan ja palotilanteen välillä vaihdellaan yhden ja nollan välillä 0,05 suuruisin askelin ja tuloksien perusteella approksimoidaan yhteys näiden välille epälineaarisella regressiolla. Yhteys on

$$M_{YP,fi} = -0,2951M_{TOP} \left(\frac{EI_{fi}}{EI} \right)^3 + 0,8302M_{TOP} \left(\frac{EI_{fi}}{EI} \right)^2 - 1,0701M_{TOP} \frac{EI_{fi}}{EI} - 0,0031 \quad (6.1)$$

Normaalivoiman yhteys normaalilämpötilan ja palotilanteen välillä saadaan yhtälöstä (5.1). Betonin lujuusluokkana käytetään C40/50 ja raudoituksena B500B. Pääraudoitus on esitetty aina tapauskohtaisesti siten että kokoluokkien 350 ja 400 pilareissa betonirauditus on 8T25, 300 luokassa 8T20 ja 250 luokassa 8T16. Pääraudoitusta ympäröivän hakaraudoituksen paksuus on 8 mm. Betonirauditus on sijoiteltu neliön muotoisissa pilareissa kulmiin ja reunan keskiväleihin ja pyöreässä tasavälein siten että tangon ja poikkileikkauksen keskipisteen välisen suoran sekä seuraavan vastaavan suoran välinen kulma on 45 astetta. Käytettävät pilarin korkeudet ovat 4500 mm, 5100 mm ja 9000 mm. Ne vastaavat nykyaikaisia tilanteita, joissa pienin arvoista edustaa tavanomaisen liike- tai sairaalarakennuksen kokonaiskerroskorkeutta. Kerroskorkeus 5100 mm edustaa mm. sairaalan kerrosväliä, jossa leikkaussalin laitteisto vaatii korkeampaa tilaa ja haalausreittejä, joita pitkin kuljetetaan esimerkiksi painavia magneettikuvantamislaitteita. Pilarikorkeus 9000 mm edustaa kaksikerrospilaria, joita käytetään mm. edellä mainittujen rakennusten aulatiloissa.

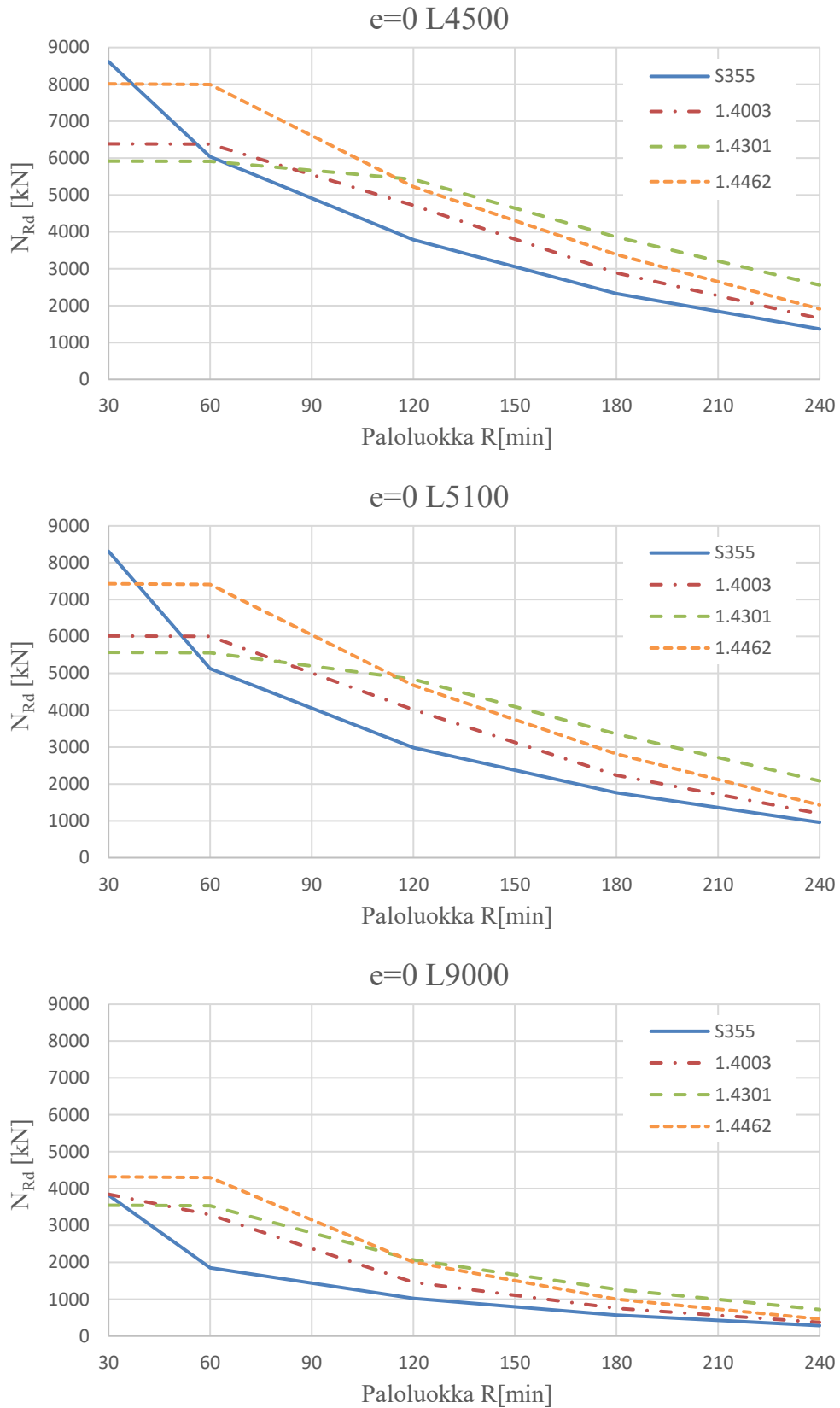
Liittopilareiden profiileja varioidaan pyöreän ja neliön välillä sekä laskenta suoritetaan betoniraudoituksella ja ilman. Taulukossa 6.1 on esitetty liittopilaripoikkileikkaukset, joille laskenta suoritetaan ja lisäksi käytettävät paloluokat ja epäkeskisyydet sekä betonin suojapeitepaksuutta, jota vaihdellaan paloluokan mukaan. Paloluokat ovat optimoitu ja pyöristetty lähimpään tasaan 5 mm. Betonin suojapeitepaksuus on mitattu teräsprofiilin sisäpinnasta pääteräksiä ympäröivän hakaraudoituksen ulkopintaan.

Kuvassa 6.2 on esitetty laskentatulokset profiilille CHS 406,4x12,5 raudoituksella 8T25. Lyhyellä pilarilla ilman epäkeskisyyttä teräslaji S355 on selvästi austeniittista ja ferriittistä terälajia ja hieman Duplexia suorituskykyisempi alle 30 minuutin palonkestoajoilla.

Tämä johtuu siitä, että mitoittava tekijä on ruostumattomilla teräksillä normaalilämpötilamitoituksen nurjahduskestävyys paloluokkaan R60 asti. Kuvaajien vaakasuorista osuuksista voidaan päätellä missä kohdin palomitoitus alkaa olemaan mitoituskriteeri. Teräslajilla 1.4462 on reilusti korkeampi myötölujuus, mutta ruostumattomilla teräksillä lujuuden materiaaliosavarmuus on 1,1, joka muuttaa lujuuksien voimasuhteen arvosta 77 % (355/460) arvoon 85 % (355/460*1,1). Lisäksi hiiliteräksen kimmomoduuli on 5 % suurempi ja tämä johtaa siihen, että teräslajin 1.4462 pilarin hoikkuusluku on 6 % suurempi. Laskentaa jatkamalla päästään lopuksi tulokseen, että teräslajin S355 liittopilarin suurin nurjahduskestävyys on näillä lähtötiedoilla 9 % (8744 kN / 8037 kN) suurempi kuin teräslajilla 1.4462. Teräslajit 1.4003 ja 1.4301 käyttäytyvät alle 60 minuutin palonkestoajoilla kuin 1.4462, mutta niiden myötölujuus on selvästi pienempi ja se johtaa selvästi pienempiin maksimikestävyksiin. Teräslaji S355 kestävyys on laskenut 30 % 30 minuutin ja 60 minuutin palokeston välillä ja ruostumattomilla teräslajeilla kestävyys ei käytännössä laske. 30 minuutin kohdalla sen kestävyys on suurin käytetyistä poikkileikkauksista ja 60 minuutin kohdalla sen normaalivoimatestävyys on yhtä poikkeusta lukuun ottamatta pienin laskennassa käytetyille poikkileikkauksille.

Taulukko 6.1 Profiilit, joille kestävyyslaskelmat suoritetaan ja lisäksi käytettävät betonin suojapeitepaksuudet. Ensimmäisessä sarakkeessa on liittopilariprofiili. Seuraavissa R30 – R240 sarakkeissa on suojapeitepaksuus millimetreinä. Sarakkeen R240 jälkeen oikealla on esitetty profiilin kanssa käytettävä betoniraudoitus. Viimeisenä e1 ja e2 ovat puristuskuorman epäkeskeisyydet mitattuna poikkileikkauksen keskipisteestä millimetreinä.

| | R30 | R60 | R120 | R180 | R240 | | e1 | e2 |
|------------------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|
| CHS 406,4x12,5 | 20 | 25 | 45 | 75 | 95 | 8T25 | 263 | 474 |
| CHS 406,4x6,0 | 20 | 25 | 45 | 75 | 95 | 8T25 | 263 | 474 |
| CHS 355,6x12,5 | 20 | 20 | 45 | 60 | 70 | 8T25 | 238 | 415 |
| CHS 355,6x6,0 | 20 | 20 | 45 | 60 | 70 | 8T25 | 238 | 415 |
| CHS 323,9x12,5 | 20 | 20 | 50 | 55 | 60 | 8T20 | 222 | 378 |
| CHS 323,9x6,0 | 20 | 20 | 50 | 55 | 60 | 8T20 | 222 | 378 |
| CHS 273x12,5 | 20 | 20 | 50 | 60 | 60 | 8T16 | 197 | 319 |
| CHS 273x6,0 | 20 | 20 | 50 | 60 | 60 | 8T16 | 197 | 319 |
| SHS 400x400x12,5 | 20 | 25 | 45 | 65 | 75 | 8T25 | 260 | 467 |
| SHS 400x400x10,0 | 20 | 25 | 45 | 65 | 75 | 8T25 | 260 | 467 |
| SHS 350x350x12,5 | 20 | 20 | 45 | 65 | 65 | 8T25 | 235 | 408 |
| SHS 350x350x8,0 | 20 | 20 | 45 | 65 | 65 | 8T25 | 235 | 408 |
| SHS 300x300x12,5 | 20 | 20 | 45 | 60 | 65 | 8T20 | 210 | 350 |
| SHS 300x300x6,0 | 20 | 20 | 45 | 60 | 65 | 8T20 | 210 | 350 |
| SHS 250x250x12,5 | 20 | 45 | 45 | 45 | 20 | 8T16 | 185 | 292 |
| SHS 250x250x6,0 | 20 | 45 | 45 | 45 | 20 | 8T16 | 185 | 292 |



Kuva 6.2 Normaalivoimakestävyyden vertailu eri teräslajeilla sekä pilarin pituuk-silla, kun profiili on CHS 406,4x12,5 ja betoniraudoitus 8T25. Puristus-kuorman muodostuu keskeisesti liittopilarille.

Erityismaininta on kerrottava, että kuvasta 6.2 mitoituspisteet on yhdistetty suoralla. Väliarvot eivät vastaa paloluokkien R45, R90 jne. arvoja. Mikäli lukija haluaa interpoloida väliarvoja, antaa kuva 6.2 epävarmalla puolella olevia tuloksia ja niitä on korjattava.

Yli 60 minuutin paloluokissa myös ruostumattomien teräslajien normaalivoimakestävyydet pienentyvät. Teräslajin 1.4462 normaalivoimakestävyys laskee 60 minuutin ja 120 minuutin paloajan välillä 35 % ja on suhteessa eniten muihin kuvan 6.2 teräslajeihin nähden, mutta sen normaalivoimakestävyys on silti verrattain korkea. Teräslajin 1.4301 kestävyys 120 minuutin paloajan kohdalla on korkein. Sen kestävyys laskee vain 8 % 30 minuutin ja 120 minuutin paloajan välillä. Teräslajin 1.4301 alkuperäinen normaalivoimakestävyys on tutkittavista teräslajeista pienin eli sen kestävyys on vähiten riippuvainen teräsprofiilin lujuudesta palotilanteessa. Yli 120 minuutin palonkestoajoilla kuvaajien luonne säilyy ennallaan ja kestävyys laskevat tasaisesti, mutta teräslaji 1.4301 on selvästi suorituskykyisin ja paloluokassa R240 sen kestävyys on 43 % alkuperäisestä kestävydestä. Vertailun vuoksi teräslajilla S355 kestävyyttä on jäljellä 16 %, teräslajilla 1.4003 26% ja teräslajilla 1.4462 24 %.

Pilarikorkeudella 5100 mm kuvaajaan muotoon ei tule suuria muutoksia, mutta normaalivoimakestävyydet ovat kokonaisuudessaan pienempiä. Normaalivoimakestävyys laskee suhteessa eniten teräslajilla S355 ja vähiten teräslajilla 1.4301. Lisäksi puristuskestävyys laskee suhteessa vähemmän pienillä palonkestoajoilla ja eniten pitkällä palonkestoajoilla. 30 minuutin palonkestoajalla kestävyys laskevat keskimäärin 6 % ja 240 minuutin kohdalla 25% verrattuna 4500 mm korkeaan liittopilariin. Tämä on tietenkin pääteltävissä, sillä liittopilarin taivutusjäykkyys laskee palonkestoajan mukaan ja toisen kertaluvun vaikutuksen merkittävyys mitoituksessa kasvaa.

Lyhyillä keskeisesti puristetuilla liittopilareilla suurin kestävyys saavutetaan yhteisvaikutuskuvaajassa lähellä pistettä A (vrt. kuva 4.1), kunhan ne eivät ole liian hoikkia. Hoikilla liittopilareilla suurinta kestävyttä edustava mitoituspiste on kuvan 4.1 pisteiden C ja B välisellä suoralla, mikäli alue BCD on poistettu käytöstä kuten tässä työssä on tehty. Tämä johtuu toisen kertaluvun laskennasta, jossa yhtenä tekijänä on mitoittavan puristuskuorman suhde teholliseen nurjahduskestävyyteen. Käytännössä nurjahduskuorman vaikutus on sisään ajettu jo yhteisvaikutuskäyrään perustuvaan mitoitukseen, joten ylimääräinen nurjahdustarkastelu, kuten esimerkiksi teräspilarin tapauksessa tulee tehdä, on turhaa työtä. Laskennallisesti liittopilari ei nurjahda vaan mitoitusmomentti kasvaa jyrkästi nurjahduskestävyyden läheisyydessä. Nurjahdustarkastelu tulee kyseeseen vain jossain yksittäistapauksissa, joissa tehollinen nurjahduskestävyys on kymmenen kertaa suurempi kuin puristuskestävyys ja toisen kertaluvun vaikutuksia ei tarvitse ottaa huomioon. Lisäksi nurjahduspituus tulee olla suurempi kuin 1,0L. Tällainen tilanne voi tulla esimerkiksi mastopilarin mitoituksessa.

Pilarikorkeudella 9000 mm kestävyyksien keskinäiset suhteet muuttuvat jonkin verran. Teräslajin S355 normaalivoimakestävyys on pienin kaikilla tutkituilla palonkestoajoilla,

lukuun ottamatta sitä, että se on hiukan suurempi kuin teräslajin 1.4301 kestävyys 30 minuutin palonkestoajalla. Korkeilla liittopilareilla taivutusjäykkyys nousee keskeisempään rooliin kuin matalilla toisen kertaluvun vaikutuksien johdosta. Ruostumattomat teräksiset säilyttävät palotilanteessa jäykkyytensä paremmin sekä pidempään ja asiaa tutkittiin tarkemmin kohdassa 2.1. Tästä syystä teräslajin S355 normaalivoimakestävyys verrattuna ruostumattomiin teräksiin on pienempi kuin lyhyemmillä pilareilla. Suuremmilla palonkestoajoilla korkeamman liittopilarin kestävyys on luonteeltaan saman kaltainen kuin lyhyemmillä.

Liittopilariprofiililla CHS 406,4x6,0 rakenneteräksen pinta-ala on alle puolet verrattuna CHS 406,4x12,5 ja erot normaalivoimakestävyyksissä käytettävien teräslajien välillä pienenevät. Suurempi osa puristuskestävyydestä on teräsbetonipoikkileikkauksella. Betonin hitaan lämpenemisen myötä teräslaji S355 pilarikorkeudella 4500 mm on 13 % suorituskykyisempi paloluokkaan R60 asti ja pilarikorkeudella 5100 mm samaa tasoa teräslajin 1.4462 kanssa. Teräslaji 1.4462 oli selvästi suorituskykyisempi muita ruostumattomia teräslajeja edellä seinämävahvuudella 12,5 mm, mutta 6 mm seinämävahvuudella sen kestävyys on samaa tasoa kuin teräslajilla 1.4003 alle 60 minuutin palonkestoajoilla. Yli 60 minuutin palonkestoajoilla sillä on hiukan suuremmat kestävyys paloluokkaan R240 asti. Teräslaji 1.4301 on huoneenlämmössä kestävyydeltään pienin, mutta palon edetessä se säilyttää kestävyytensä kauemmin kuin muut teräslajit. Paloluokan R120 kohdalla ja sen jälkeen se on teräslajeista suorituskykyisin. Pilarikorkeudella 9000 mm teräslajien erot kestävyyksien osalta ovat pieniä, mutta saman suuntaiset kuin mitä havaitaan kuvan 6.2 vastaavasta tilanteesta.

Liittopilaripoikkileikkauksella CHS 406,4x12,5 ilman betoniraudoitusta normaalivoimakestävyys ovat keskimäärin 16 % pienemmät kuin vastaavalla raudoitettulla liittopilaripoikkileikkauksella paloluokassa R30. Teräslajin S355 kestävyys pienenee suhteessa eniten pilarikorkeuden noustessa ja 5100 mm pilarikorkeudella sen kestävyys pienenee 11 % ja 9000 mm pilarikorkeudella 24 %. Ruostumattomilla teräksillä kestävyyksien suhde ei pienene vaan yllättäen nousee hieman pilarikorkeuden kasvaessa, kun kestävyys verrataan 4500 mm korkeaan pilariin. Paloluokassa R60 erot ovat suuremmat ja teräslajin S355 kestävyys on keskimäärin 50 % pienempi kuin raudoitettulla poikkileikkauksella. Muiden teräslajien kohdalla erot ovat 39 % (1.4003), 18 % (1.4462) ja 21 % (1.4301). Teräslajien S355, 1.4301 ja 1.4462 suhteellinen kestävyys pysyy likimain vakiona pilarikorkeuden kasvaessa, mutta teräslajilla 1.4003 suhteellinen kestävyys laskee arvosta 31 % 4500 mm pilarikorkeudella arvoon 49 % 9000 mm pilarikorkeudella. Paloluokassa R120 kestävyys ovat keskimäärin 61 % pienemmät kuin raudoitettulla versiolla ja kestävyys ovat laskeneet alkuperäisestä keskimäärin 74 % käytetyillä teräslajeilla. Toisaalta erot teräslajien välillä ovat suuret. Teräslajin S355 kestävyys on laskenut keskimäärin 83 %, teräslajin 1.4003 73 %, teräslajin 1.4301 53 % ja teräslajin 1.4462 85 %. Austeniittinen teräslaji 1.4301 on selvästi suorituskykyisin lasketuista teräslajeista ja sen absoluuttinen normaalivoimakestävyys on 4500 mm pilarikorkeudella 55 % suurempi kuin

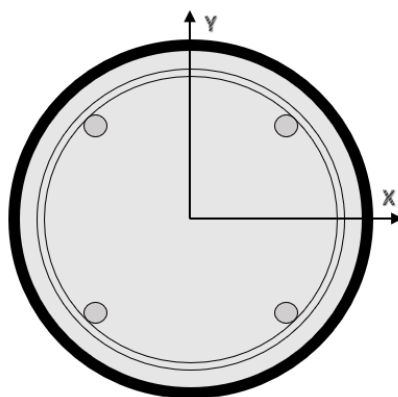
seuraavaksi korkein (1.4001) ja 9000 mm pilarikorkeudella 64 %. Paloluokissa R180 ja R240 ei keskinäisille voimasuhteille tule varteenotettavia muutoksia ja teräslaji 1.4301 on selvästi muita kestävämpi. Seinämävahvuudella 6 mm kestävyyksien keskinäiset erot pienenevät. Varteenotettavin ero tulee paloluokilla R120, R180 ja R240, joissa teräslajin S355 kestävyys on yllättäen samaa luokkaa kuin teräslajien 1.4003 ja 1.4462 ja tietyissä pilarikorkeuksissa hiukan suurempi. Teräslaji 1.4301 on myös tässä tapauksessa selvästi kestävämpi kuin muut tutkitut teräslajit.

Raudoittamaton liittopilari ei ole hyvä rakenneratkaisu, koska betonin mahdollisien halkeamien kasvu ei rajoitu. Lisäksi palotilanteessa betonin keskiosaan siirtyvä kosteus aiheuttaa lisäpainetta ja hakaraudoituksen puuttuessa se saattaa aiheuttaa betonin äkillisen murtumisen. Ja käytännöllisesti katsoen betonin raudoitus ja siihen liittyvä työ on suhteessa pieni verrattuna sen muodostamaan lisäkestävyyteen. Raudoitetun poikkileikkauksen kestävyys vastaa yhtä tai kahta kokoluokkaa suuremman raudoittamattoman liittopilarin kestävyyttä.

Eurokoodi ei määrää poikkileikkausta raudoitettavaksi, mutta se ei myöskään anna lisäohjeita mm. raudoittamattoman liittopilarin jäykkyyden laskentaan, sillä halkeilu pienentää taivutusjäykkyyttä merkittävästi. Eurokoodi SFS-EN 1994-1-1 antaa kaksi eri taivutusjäykkyyden laskentakaavaa. Toisessa betonin taivutusjäykkyyttä pienennetään kertoimella 0,6 ja sitä käytetään nurjahduksen tai muun stabiilisuusiän tarkastelussa. Toisessa otetaan huomioon halkeilun sovitus- ja korjauskertoimilla, joiden suuruudet ovat 0,9 ja 0,5. Kerrointa 0,5 käytetään betonin taivutusjäykkyyden pienentämiseen ja poikkileikkauksen kokonaistaivutusjäykkyyttä pienennetään lisäksi kertoimella 0,9. Tätä taivutusjäykkyyttä käytetään mitoituksessa ja toisen kertaluvun vaikutuksien arvioinnissa. Taivutusjäykkyyksien laskentakaavat on esitetty kappaleessa 2.2 [12]

Teoriassa betoniin syntyy halkeamia, kun poikkileikkausta rasittava taivutusmomentin ja normaalivoiman yhdistelmä on tarpeeksi epäedullinen. Normaalivoimasta syntyvä puristusjännitys on oltava pienempi kuin taivutusmomentista syntyvä vetojännitys betonipoikkileikkauksen reunalla. Lisäksi jännitysresultantin on oltava suurempi kuin betonin vetojännitys. Ensimmäisten halkeamien syntyessä betonipoikkileikkauksen taivutuskeskiön sijainti siirtyy halkeilemattomaan suuntaan ja liittopilarin taivutusjäykkyyden laskenta muuttuu. Samalla myös kuormituksen jakautuminen teräsprofiili-, betonirauditus- ja betonipoikkileikkauksen välillä muuttuu ja laskennasta tulee teoriassa iteratiivinen. Tämä taas ei sovellu tavalliseen suunnittelutyöhön ja se on otettu huomioon suunnittelustandardeissa edellä mainituilla kokonaisjäykkyyden pienennyskertoimilla. Tässä tutkimuksessa on oletettu, että betonin halkeaminen voidaan ottaa huomioon kertoimella 0,5 ja liittopilaripoikkileikkauksen keskiön siirtyminen kertoimella 0,9, koska liittopilarin stabiilisuusmurtoa ei oteta huomioon. [3][12]

Tutkimuksessa [18] on selvitetty liittopilaripoikkileikkauksen halkeilua analyttisesti ottamalla huomioon betonipoikkileikkauksen jännitykset ja siirtymä. Tutkimuksen keskiössä on CHS 127x5,0 profiili, mutta tuloksia voidaan soveltaa myös edellä laajemmin käsiteltyyn liittopilaripoikkileikkausta CHS 406,4x12,5. Liittopilarin teräsprofiilin teräslaji on S355, betonin lujuusluokka on C30/37 ja betonirauditus 4T25 B500B sekä betonin suojapeitepaksuus 20 mm ja pääraudoituksen yhteen sitova hakaraudoitus T8. Poikkileikkaus on esitetty kuvassa 6.3.



Kuva 6.3 Liittopilaripoikkileikkaus CHS 406,4x12,5 ja betonirauditus 4T25 + haat T8.

Vertaillaan analyttisiä laskentatuloksia Eurokoodin SFS-EN 1994-1-1 esittämiin taivutusjäykkyysien laskenta-arvoihin. Halkeilu vaatii taivutusrasitusta, joten valitaan kuormiksi 500 kN puristusta ja 700 kNm taivutusmomenttia, jolloin pilarin SFS-EN 1994-1-1 mukainen käyttöaste on 93,3 %. Lähteen [18] mukaisessa analyttisessä laskennassa, kun viruma otetaan huomioon betonin kimmomoduulissa, betonipoikkileikkaus halkeilee n. 168 mm matkalta ja taivutusjäykkyyden lukuarvoksi tulee 73,1 MN*m². Poikkileikkauksen taivutusneutraaliakseli siirtyy n. 13 mm halkeilemattomaan suuntaan. Eurokoodin SFS-EN 1994-1-1 mukaan taivutusjäykkyysien lukuarvot ovat $EI_{eff} = 75,3 \text{ MN*m}^2$ ja $EI_{eff,II} = 66,6 \text{ MN*m}^2$. Taulukossa 6.2 on esitetty taivutusjäykkyyden lukuarvot lähteen [18] ja SFS-EN 1994-1-1 mukaan sekä raudoitettulle että raudoittamattomalle poikkileikkaukselle CHS 406,4x12,5. Lisäksi taulukossa on esitetty eri laskentatapojen taivutusjäykkyyksien lukuarvot ja niiden prosentuaalinen suhde isotrooppisen poikkileikkauksen suurimpaan teoreettiseen taivutusjäykkyyteen sekä halkeilleen poikkileikkauksen osan korkeus ja taivutusneutraaliakselin siirtymä. Tuloksissa on otaksuttu liittopilariin täydellinen liittovaikutus ja taivutusjäykkyydet on laskettu samaan suuntaan, jossa halkeaminen tapahtuu. Raudoittamattomassa tapauksessa liittopilarin SFS-EN 1994-1-1 mukainen käyttöaste on 102,9 %.

Normaalivoima ja taivutusmomentti kuitenkin yleensä riippuvat toisistaan jonkin verran. Käytännössä momenttia syntyy ulkoisesta taivutusrasituksesta ja normaalivoiman epäkeskisyydestä sekä laskennallisista seikoista kuten pilarin vinoudesta ja käyryydestä sekä toisen kertaluvun vaikutuksista. Taivutusrasituksien ollessa riippuvaisia puristuskuormituksesta betonin halkeilu siirtää liittopilarin taivutuskeskiötä epäkeskisyyden suuntaan,

jolloin teoriassa epäkeskisyys pienenee. Tämä voi tapahtua, kunhan puristuskuorman sijainti ei siirry pilarin siirtymän mukana, kuten esimerkiksi mastopilarin yläpään tapauksessa tapahtuu.

Taulukko 6.2 Liittopilaripoikkileikkauksen CHS 406,4x12,5 taivutusjäykkyudet eri laskentatapojen mukaan, kun huomioidaan betoniraudoitus ja viruma. Taivutusjäykkyys EI_{\max} on poikkileikkauksen suurin teoreettinen taivutusjäykkyys, EI_{kand} on lähteen [18] mukainen taivutusjäykkyys ja $EI_{\text{eff.II}}$ ja EI_{eff} ovat SFS-EN 1994-1-1 mukaiset taivutusjäykkyudet. x on lähteen [18] mukainen haljenneen poikkileikkauksen pituus ja d on taivutusneutraaliakselin siirtymä.

| Betoni- raudoitus | Viruma | EI_{\max} [MNm ²] | EI_{kand} [MNm ²] | $EI_{\text{eff.II}}$ [MNm ²] | EI_{eff} [MNm ²] | x [mm] | d [mm] |
|----------------------|--------|------------------------------------|---|---|--|-------------|-------------|
| 4T25 | Kyllä | 80,4 | 73,1 90,9 % | 66,6 82,8 % | 75,3 93,6 % | 168,1 | 12,9 |
| 4T25 | Ei | 100,9 | 79,6 78,9 % | 75,8 75,1 % | 87,5 86,8 % | 198,1 | 27,8 |
| - | Kyllä | 76,0 | 68,6 90,2 % | 62,7 82,5 % | 71,0 93,4 % | 170,6 | 14,3 |
| - | Ei | 96,4 | 74,8 77,6 % | 72,1 74,8 % | 83,5 86,6 % | 200,7 | 30,0 |

Palomitoituksessa liittopilaripoikkileikkauksen taivutusjäykkyuden laskentaan Eurokoodi ei määrittele yksinkertaiselle laskentamenetelmälle vastaavia yksinkertaisia pienennyskertoimia. Taivutusjäykkyys lasketaan siten, että jokaiselle liittopilaripoikkileikkauksen materiaalille on oma sovituskerroin ϕ . Standardin SFS-EN 1994-1-2 liitteessä G on ainoat Eurokoodista löytyvät sovituskertoimet ja ne ovat liittopilarille, jossa teräsprofiili on täysin tai osittain betonilla ympäröity. Tällaista liittopilaria käytetään muualla Euroopassa, mutta ei Suomessa. Joissain tapauksissa nämä kertoimet on otettu käyttöön myös betonilla täytetyille putkiliittopilarille, mutta periaatteessa eri menetelmiä ei saa yhdistellä. Muiden kuin liitteen G sovituskertoimien osalta Eurokoodi ohjaa suunnittelijan tekemään polttokokeita oikeiden kertoimien määrittelemiseksi. [4][5][12]

Liittopilarin CHS 406,4x12,5 tapauksessa liitteestä G saatavat sovituskertoimet ovat paloluokassa R60 $\phi_a = 0,7$, $\phi_s = 0,9$ ja $\phi_c = 1,2$. Lämpötilasta aiheutuvat materiaalien kimmokertoimen pienennyskertoimet ovat vastaavasti $k_{Ea,\theta} = 0,074$, $k_{Es,\theta} = 0,644$ ja $k_{Ec,\theta} = 0,373$. Betonin pienennyskerroin on painotettu keskiarvo. Liittopilari on merkittävässä taivutusrasituksessa ja palotilanteen kuormiksi valitaan 500 kN puristusta ja 180 kNm taivutusmomenttia. Poikkileikkauksessa on 4T25 betoniraudoitus. Liittopilarin käyttöaste on 96,4 %. Mikäli poikkileikkaus yksinkertaistetaan siten että betonipoikkileikkauksen lämpötilan kasvusta aiheutuva lujuuden pienentyminen on vakio koko poikkileikkauksessa, laskee taivutusjäykkyys 53 % alkuperäisestä ja taivutusneutraaliakseli siirtyy 49,7

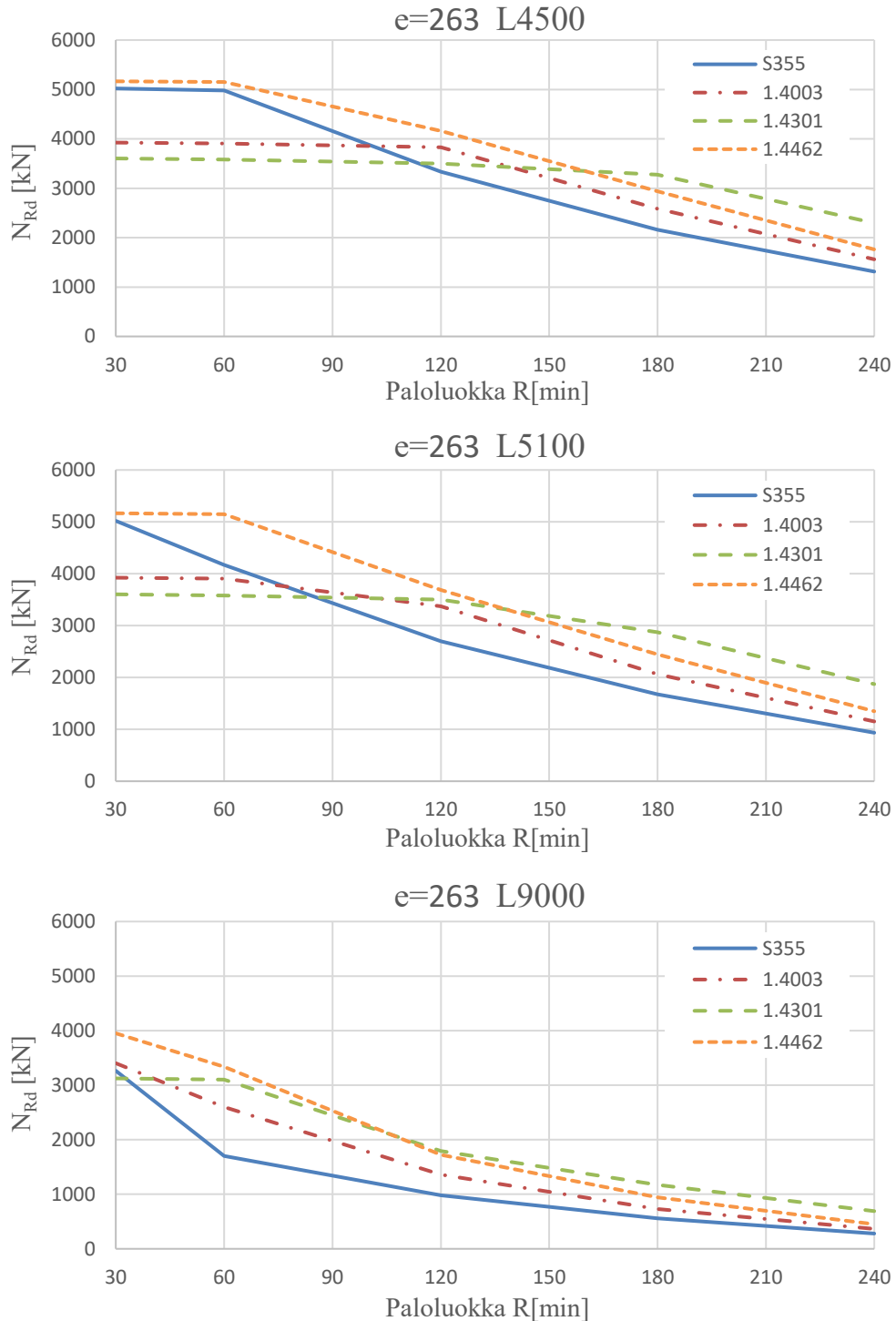
mm, kun otetaan huomioon betonin halkeilu. Sovituskertoimien kanssa taivutusjäykkyys on 105 % alkuperäisestä eli karkeasti puolet liikaa. Edellä tässä kappaleessa suoritetuissa laskemissa palotilanteen taivutusjäykkyys on laskettu hieman eri tavalla ottaen huomioon betonin tarkka lämpötilajakauma ja tällä tavalla tulokseksi saataisiin 58 % alkuperäisestä. Sovituskertoimet ovat rakennettu keskeisesti puristetulle liittopilarin silmällä pitäen, mutta liitteessä G on myös annettu lausekkeita, mikäli puristuskuormitus tulee epäkeskeisesti pilarille. Epäkeskisyyden vaikutuspiste ei kuitenkaan saa poistua poikkileikkauksen alueelta. Käytännössä se tarkoittaa sitä, että betoniin ei synny vetolujuutta ylittäviä jännityksiä ja betoni ei halkeile eikä siis poikkileikkaukskeskiö siirry. Lasketaan edellinen esimerkki uudelleen käyttäen puristuskuormitusta 900 kN ja kuorman epäkeskisyyttä 203 mm ($<1/2D$), jolloin mitoitusmomentiksi tulee 182,7 kNm. Nyt betoniin ei synny halkeamia ja itseasiassa koko poikkileikkaus on puristuksella ja taivutusjäykkyys ei laske. Sovituskertoimien kanssa tosin taivutusjäykkyudeksi tulee edelleen 105 % alkuperäisestä. [18]

Raudoittamalla poikkileikkauksella palotilanteessa samassa esimerkissä kuin edellä saadaan liittopilaripoikkileikkauksen taivutusjäykkyudeksi 49 % alkuperäisestä ja taivutusneutraaliakseli siirtyy 45,6 mm. Kuormia joudutaan hieman pienentämään, jotta liittopilarin kestävyys olisi sallituissa rajoissa ja ne valitaan 500 kN puristusta ja 65 kNm taivutusmomenttia, joka tuottaa 98,6 % käyttöasteen. Sovituskertoimilla taivutusjäykkyudeksi saadaan 107 % alkuperäisestä ja laskennassa käytetty tarkemmin laskettu arvo olisi 51 %. [18]

Sovituskertoimista voitaisiin sanoa yhteenvetona, että standardin SFS-EN 1994-1-2 liitteen G ehdottamia arvoja voidaan käyttää ainakin liittopilarin CHS 406,4x12,5 tapauksessa, kun otetaan huomioon Eurokoodin määräämät rajoitukset. Toisaalta laajempaa käyttöä ei voi tämän tutkimuksen perusteella suoraan hyväksyä ja ongelmasta olisi hyvä tehdä lisätutkimuksia. Eurokoodien yleispäteviä suunnittelumenetelmiä ja -ohjeita olisi hyvä täydentää myös tämän työn keskiössä olevalle liittopilarityypille. [12]

Kuvassa 6.4 on esitetty liittopilarin CHS 406,4x12,5 raudoituksella 8T25 normaalivoimakestävyydet, kun normaalivoima siirtyy liittopilarin puukkoliitoksella ja epäkeskisyyden arvo on 263 mm. Epäkeskisyyden muodostaa liittopilarin selvästi suurempia taivutusrasituksia kuin keskeisesti puristetussa tapauksessa. Kerroskorkeuden 4500 mm tapauksessa normaalilämpötila on mitoittava kriteeri kaikilla teräslajeilla R60 asti ja palomitoitus tulee mitoittavaksi teräslajien 1.4003 sekä 1.4301 osalta vasta paloluokassa R120. Lisäksi on mainittava, että teräslajin 1.4301 kestävyys on laskenut alkuperäisestä paloluokassa R180 vain 9% ja sillä on korkeampi kestävyys paloluokassa R180 kuin muilla teräslajeilla ja sen kestävyuden paremmuus korostuu vielä entisestään palon edetessä paloluokkaan R240. Teräslajin 1.4462 kestävyys alle 60 minuutin palonkestoajoilla on 3 % suurempi kuin teräslaji S355, 32 % korkeampi kuin teräslajilla 1.4003 ja 43 % korkeampi kuin teräslaji 1.4301. Tunnin palon jälkeen teräslajien S355 ja 1.4462 kestävyys alkavat pienentyä. Teräslajin S355 kestävyys laskee suhteessa eniten paloluokkien R60 ja R120

välillä ja sen kestävyys on kahden tunnin palon kohdalla ja sen jälkeen teräslajeista pienin. Teräslaji 1.4462 kestää kuumenemista paremmin kuin S355 ja sen kestävyys on suurin vielä kahden tunnin palon kohdalla, jonka jälkeen suurimman kestävyys titteli siirtyy teräslajille 1.4301.



Kuva 6.4 Normaalivoimakkestävyyden vertailu eri teräslajeilla sekä pilarin pituuk-silla, kun profiili on CHS 406,4x12,5 ja betoniraudoitus 8T25. Puristus-kuorman epäkeskisyyden arvo on 263 mm.

Pilarikorkeuden nostaminen arvosta 4500 mm arvoon 5100 mm ei vaikuta kestävyysluokkaan R30. Paloluokassa R60 kestävyys pienenevät keskimäärin 4 %. Palonkestoaajan pidentyessä kestävyysluokkatasaiset ja paloluokassa R240 kestävyysluokkatasaiset laskeneet keskimäärin 24 %. Teräslaji 1.4462 on 30 minuutin palon kohdalla kestävyysluokkatasain korkein, kun pilari on 5100 mm korkea. Teräslajin S355 kestävyys on 97 % sen kestävyysluokkasta, teräslaji 1.4003 76 % ja teräslaji 1.4301 70 %. Paloluokassa R60 ruostumattomat teräkset eivät ole menettäneet kestävyysluokkastaan, mutta teräslaji S355 kestävyys on laskenut 17 % ja on nyt enää 81 % teräslajin 1.4462 kestävyysluokkasta. Paloluokassa R120 teräslajilla 1.4462 on edelleen korkein kestävyys. Muiden teräslajien suhteelliset kestävyysluokkatasat siihen verrattuna ovat 73 % (S355), 91 % (1.4003) ja 95 % (1.4301). Ruostumattomien teräslajien kestävyysluokkatasat ovat laskeneet keskimäärin 15 % alkuperäisestä ja teräslajilla S355 46 %. Paloluokassa R180 teräslaji 1.4301 ohittaa teräslajin 1.4462 kestävyysluokkassa. Muiden teräslajien kestävyysluokkatasat suhteessa teräslajiin 1.4301 ovat 85 % (1.4462), 72 % (1.4003) ja 58 % (S355). Paloluokassa R240 keskinäiset voimasuhteet eivät muutu, mutta teräslajin 1.4301 ylivoimainen kestävyys korostuu. Kestävyysluokkatasat suhteet ovat teräslajiin 1.4301 verrattuna 72 % (1.4462), 62 % (1.4003) ja 50 % (S355). Teräslajin 1.4301 erinomaisista ominaisuuksista kertoo se, että paloluokassa R30 sen kestävyys on 3603 kN ja paloluokassa R240 1872 kN. Kestävyys on laskenut ainoastaan 48 % neljän tunnin palon aikana.

Pilarikorkeudella 9000 mm toisen kertaluvun vaikutukset korostuvat vielä voimakkaammin. Ainoastaan teräslajin 1.4301 kestävyys pysyy vakiona paloluokkien R30 ja R60 välillä. Muilla teräslajeilla kestävyys alkaa laskea heti paloluokan R30 jälkeen. Yksikerroksiseen pilariin nähden kestävyysluokkatasat ovat keskimäärin 21 % pienemmät paloluokassa R30 ja laskevat tasaisesti siten että ne ovat 75 % pienemmät paloluokassa R240. Paloluokassa R30 teräslajilla 1.4462 on korkein kestävyys ja teräslajin 1.4003 kestävyys on 86 % sen arvosta. Teräslajilla S355 kestävyys on 83 % ja teräslajilla 1.4301 79 % teräslajin 1.4462 kestävyysluokkasta. Paloluokassa R60 keskinäiset voimasuhteet ovat muuttuneet siten että kärkipaikalla jatkaa teräslaji 1.4462, mutta teräslaji 1.4301 on siirtynyt teräslajien S355 ja 1.4003 edelle. Teräslajin 1.4301 kestävyys on 93 % teräslajin 1.4462 kestävyysluokkasta ja vastaavat arvot teräslajeilla 1.4003 ja S355 ovat 78 % ja 51 % mainitsemisjärjestyksessä. Paloluokassa R120 teräslaji 1.4301 ohittaa niukasti teräslajin 1.4462, jonka kestävyys on 96 % teräslajin 1.4301 kestävyysluokkasta. Teräslajien 1.4003 ja S355 kestävyysluokkatasat ovat 76 % ja 55 % teräslajin 1.4301 kestävyysluokkasta mainitsemisjärjestyksessä. Suuria muutoksia ei tapahdu edetessä paloluokkiin R180 ja R240. Paloluokassa R180 keskinäiset suhteet ovat 80 % (1.4462), 62 % (1.4003) ja 48 % (S355) sekä paloluokassa R240 ne ovat 65 % (1.4462), 53 % (1.4003) ja 41 % (S355).

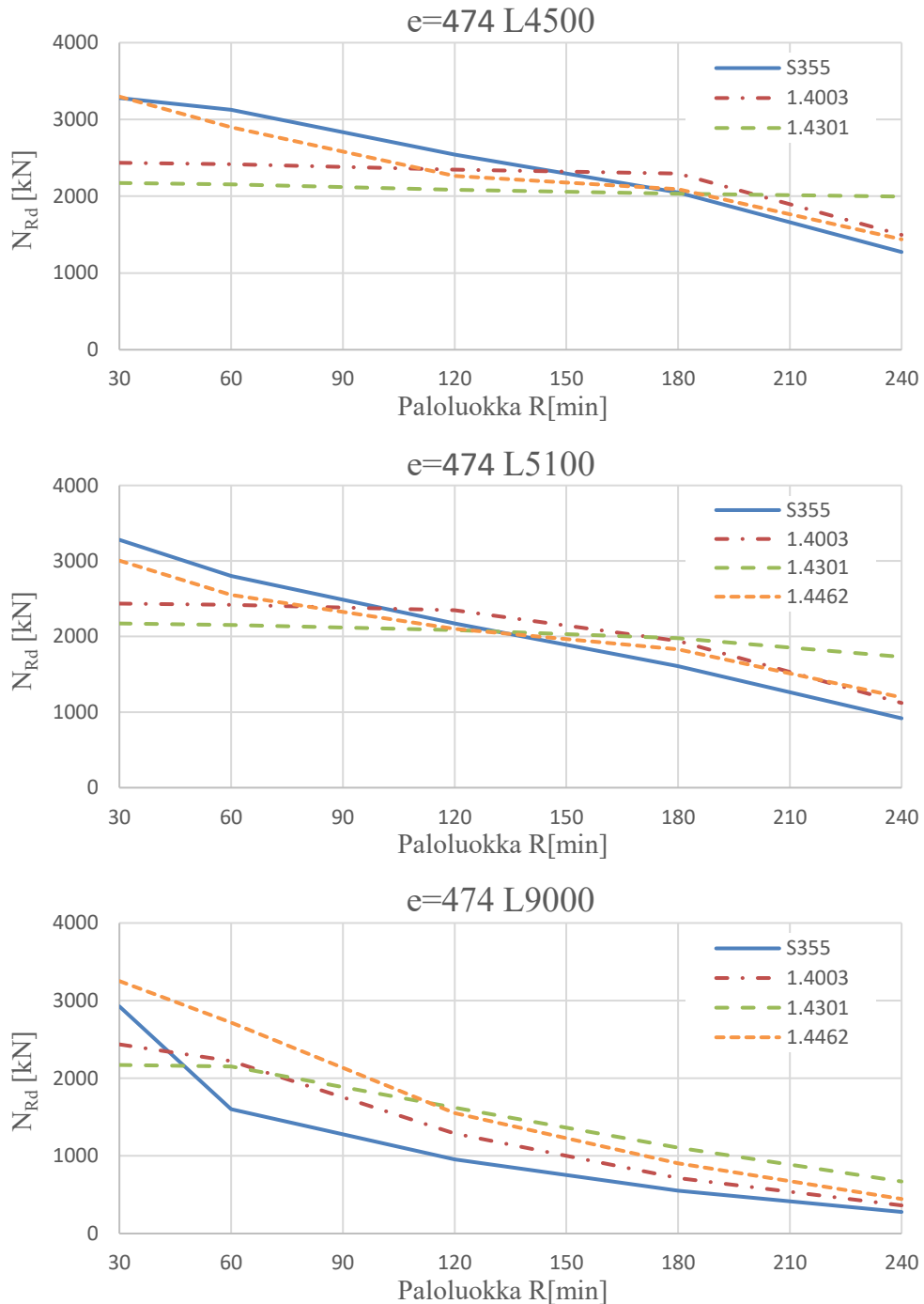
Kuvassa 6.5 on esitetty liittopilarin CHS 406,4x12,5 normaalivoimakkeusluokkatasat, kun sen vaikutus tulee kokonaisuudessaan epäkeskeisesti, jonka arvo on 474 mm. Tällaista tilannetta kuvaa suorakaidekonsolin ja palkin liitoksen aiheuttama epäkeskeisyys reunapilarilla. Liittopilarin betonirauditus on 8T25.

Epäkeskisyyden arvon noustessa mitoituskriteeri ei ole enää puhdas puristuskestävyys vaan yhdistetty normaalivoima ja taivutusmomentti. Mitoituspiste on yhteisvaikutuskuvaajassa suurimman taivutusmomentin alueella, joka on kuva 4.1 merkinnöillä pisteiden B ja C välisellä suoralla. Tämä johtuu siitä, että palotilanteessa rakenneteräksen lujuus laskee nopeasti ja betonisydämessä sijaitseva betonirauditus muodostaa valtaosan liittopilarin taivutuskestävyydestä. Toisin kuin pienemmillä epäkeskisyyksillä (vrt. kuvien 6.2 ja 6.4 tilanteita) teräslajin S355 suorituskyky kestävyyden kannalta on suhteessa korkeampi ja se ei laske yhtä kriittisesti pilarikorkeuksien 4500 mm ja 5100 mm tapauksissa, koska sekä sen kimmomoduuli että lujuus ovat alun perin korkeammat kuin ruostumattomilla teräslajeilla. Pilarikorkeuden ollessa 9000 mm teräslaji S355 sisäinen lämpötilakenttä on niin epädullinen ruostumattomiin teräslajeihin verrattuna, että hoikkuus sekä toisen kertaluvun vaikutukset korostuvat ja se menettää suunnittelun kannalta edellä mainitun etulyöntiaseman. Lyhyillä pilareilla asia korostuu profiilin CHS 406,4x6,0 tapauksessa (ks. liite 5), jossa teräslajin S355 kestävyys on vielä paloluokassa R180 12 % korkeampi kuin ruostumattomilla teräslajeilla, kun pilarikorkeus on 4500 mm. Pilarikorkeudella 5100 mm teräslaji S355 on kestävyydeltään korkeampi paloluokkaan R120 asti, ja tällöin se 11 % kestävämpi kuin seuraavaksi kestävin teräslaji (1.4003).

Pilarikorkeudella 4500 mm teräslajin 1.4462 kestävyys on suurin paloluokassa R30, mutta ero teräslajiin S355 on vain puoli prosenttia. Teräslajin 1.4003 kestävyys on 74 % ja teräslajin 1.4301 66 % teräslajin 1.4462 kestävyydestä. Paloluokassa R60 teräslajilla S355 on korkeampi kestävyysarvo ja teräslajin 1.4462 kestävyys on 93 % sen arvosta. Teräslajeilla 1.4003 ja 1.4301 on selvästi heikommat kestävyysarvot ja ne ovat teräslajin S355 arvosta 77 % ja 69 % mainitsemisjärjestyksessä. Paloluokassa R120 erot tasoittuvat ja teräslajin 1.4003 kestävyys on suurempi kuin teräslajin 1.4462 kestävyys. Ruostumattomien teräslajien 1.4003, 1.4301 ja 1.4462 kestävydet ovat 92 %, 82 % ja 89 % teräslajin S355 kestävyydestä mainitsemisjärjestyksessä. Paloluokassa R180 teräslajien 1.4003 ja 1.4301 kestävydet eivät ole merkittävästi laskeneet, jolloin niiden suhde teräslajeihin S355 ja 1.4462 paranee. Teräslaji 1.4003 on jo ohittanut ne ja on kestävyydeltään suurin. Suhteessa muiden teräslajien kestävydet ovat 91 % (1.4462), 89 % (S355) ja 89 % (1.4301) sen kestävyydestä. Teräslajin 1.4301 kestävyys laskee paloluokkien R30 ja R240 välillä vain 9 % ja se on paloluokassa R240 kestävyydeltään suurin eri teräslajeista. Keskinäiset suhteet ovat 75 % (1.4003), 72 % (1.4462) ja 64 % (S355).

Pilarikorkeudella 5100 mm S355 on paloluokassa R30 kestävin. Ruostumattomien teräslajien ovat sen kestävyydestä 92 % (1.4462), 86 % (1.4003) ja 77 % (1.4301). Paloluokassa R60 keskinäiset suhteet pysyvät samoina, mutta erot pienenevät. Paloluokassa R120 teräslaji S355 kestävyys on pienentynyt niin paljon, että teräslaji 1.4003 on kestävyydeltään korkeampi. Keskinäiset suhteet verrattuna teräslajiin 1.4003 ovat 93 % (S355), 89 % (1.4462) ja 89 % (1.4301). Kuten pilarikorkeudella 4500 mm teräslaji 1.4301 säilyttää kestävyytensä erinomaisesti korkeilla palonkestoajoilla ja tässä tapauksessa sen kestävyys on 2 % korkeampi kuin teräslajin 1.4001 paloluokassa R180 ja 69 %

korkeampi paloluokassa R240. Pilarikorkeuden 9000 mm tapauksessa teräslaji S355 suorituskyky laskee ja se on kestävyydeltään heikoin paloluokissa R60, R120, R180 ja R240. Paloluokassa R30 se jää selvästi teräslajin 1.4462 taakse. Teräslaji 1.4301 säilyttää jälleen kerran kestävyytensä parhaiten ja paloluokassa R120 ja sen jälkeen sen suorituskyky on teräslajeista parhain.



Kuva 6.5 Normaalivoimakestävyyden vertailu eri teräslajeilla sekä pilarin pituuksilla, kun profiili on CHS 406,4x12,5 ja betonirauditus 8T25. Puristuskuorman epäkeskisyyden arvo on 474 mm.

Yksityiskohtaisia kestävyysvertailuja muille taulukon 6.1 profiileille ei suoriteta. Yleisesti tulokset noudattavat karkeasti tiettyä kaavaa ja kuvaajien muodot ja niiden väliset suhteet eivät eroa merkittävästi eri liittopilariprofiileilla. Luonnollisesti kestävyys pienenevät pienempiin profiilien siirtyessä ja poikkileikkaukseltaan pienemmän profiilin lämpötilakenttä on epäedullisempi mikä aiheuttaa taivutusjäykkyyden nopeamman pienene-
misen. Kuvissa 6.2, 6.4 ja 6.5 esitetyt kuvaajat muistuttavat hyvin karkeasti lineaarista funktiota, jonka derivaatta on negatiivinen ja lisäksi vakio. Pienemmillä profiileilla funktioiden derivaatat ovat negatiivisia, mutta kasvavia. Toisin sanoen niiden kestävyys pienenee nopeammin kuin suurilla profiileilla.

Kestävyyslaskelmia on avattu enemmän liitteessä 4 profiilille CHS 406,4x12,5 raudoituksella 8T25 ja pilarikorkeuden ollessa 4500 mm. Lisäksi liitteessä on esitetty raudoituksen sijoittelu ja profiilin lämpötilajakauma. Taulukossa 6.3 on esitetty kuvien 6.2, 6.4 ja 6.5 kestävyysarvot taulukoituina. Liitteessä 5 on taulukoitu laskentatulokset muille taulukon 6.1 profiileille. Seuraavassa asetetaan teräslajit paremmuusjärjestykseen, jonka alkudatana käytetään laskettuja kestävyysarvoja, jotka on esitetty taulukossa 6.3 ja liitteessä 5. Mittaustuloksia on 5760 kappaletta eli tuloksien vertailuja on neljännes tästä eli 1440, koska teräslajeja on käytössä neljä.

Ottamalla huomioon kaikki laskentatulokset, teräslaji 1.4301 suoriutuu vertailuista keskimääräisesti parhaiten ja on kestävyydeltään korkein 54,9 % kaikista tapauksista. Teräslaji 1.4462 on korkein 30,1 % tapauksista, teräslaji S355 12,4 % ja viimeisinä, ja tällä kertaa myös vähäisempänä, teräslaji 1.4003 vain 2,6 % tapauksista.

Austeniittista ruostumatonta terästä edustava teräslaji 1.4301 on suvereeni pitkillä palonkestoajoilla ja paloluokassa R240 se on 99,0 % tapauksista parhain, paloluokassa R180 95,1 % ja paloluokassa R120 79,9 %. Pilarikorkeudella 9000 mm se on paloluokissa R120, R180 ja R240 kestävyydeltään korkein kaikissa tapauksissa. Pilarikorkeuksilla 4500 mm ja 5100 mm sen kestävyys on näillä paloluokilla suurin valtaosassa tapauksista, mutta suurilla epäkeskisyyksillä se ei ole enää yhtä ylivoimainen. Tästä voidaan päätellä, että teräslajin 1.4301 korkea suorituskyky perustuu sen kykyyn säilyttää taivutusjäykkyytensä eikä niinkään taivutuskestävyyteen. Paloluokissa R60 ja R30 teräslaji 1.4301 on vain harvoin kestävyydeltään korkein alhaisen myötölujuutensa vuoksi. Se on kestävyydeltään korkein paloluokassa R60 vain 0,7 % tapauksista ja ei ollenkaan paloluokassa R30.

Ferriittistä ruostumatonta terästä edustava teräslaji 1.4003 ei sovellu liittopilarin rakeneteräkseksi. Sen kestävyys on suurin vain yksittäistapauksissa paloluokassa R30 ja pilarikorkeuden ollessa 9000 mm, jolloin se on kestävyydeltään korkein karkeasti joka viidennessä tapauksessa.

Taulukko 6.3 Kuvien 6.2, 6.4 ja 6.5 kestävyysarvot taulukoituina. Korostetut arvot kuvaavat suurinta kestävyyttä teräslajien välillä.

| CHS 406,4x12,5 C40/50, 8T25 | | | R30 c = 20 | R60 c = 25 | R120 c = 45 | R180 c = 75 | R240 c = 95 |
|--------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e = 0 | L4500 | S355 | 8617 | 6039 | 3783 | 2322 | 1365 |
| | | 1.4003 | 6388 | 6378 | 4719 | 2887 | 1650 |
| | | 1.4301 | 5919 | 5910 | 5420 | 3863 | 2558 |
| | | 1.4462 | 8015 | 7999 | 5225 | 3388 | 1911 |
| | L5100 | S355 | 8310 | 5127 | 2987 | 1759 | 958 |
| | | 1.4003 | 6013 | 6003 | 4012 | 2237 | 1194 |
| | | 1.4301 | 5569 | 5558 | 4838 | 3352 | 2082 |
| | | 1.4462 | 7430 | 7413 | 4672 | 2814 | 1426 |
| | L9000 | S355 | 3821 | 1848 | 1020 | 567 | 282 |
| | | 1.4003 | 3846 | 3285 | 1460 | 755 | 371 |
| | | 1.4301 | 3546 | 3532 | 2062 | 1264 | 720 |
| | | 1.4462 | 4318 | 4299 | 2004 | 995 | 461 |
| e = 263 mm | L4500 | S355 | 5020 | 4981 | 3331 | 2161 | 1313 |
| | | 1.4003 | 3924 | 3904 | 3829 | 2587 | 1561 |
| | | 1.4301 | 3603 | 3583 | 3501 | 3275 | 2295 |
| | | 1.4462 | 5165 | 5150 | 4158 | 2941 | 1761 |
| | L5100 | S355 | 5019 | 4169 | 2699 | 1674 | 935 |
| | | 1.4003 | 3923 | 3903 | 3371 | 2064 | 1152 |
| | | 1.4301 | 3603 | 3582 | 3501 | 2873 | 1872 |
| | | 1.4462 | 5165 | 5149 | 3685 | 2443 | 1349 |
| | L9000 | S355 | 3265 | 1703 | 982 | 557 | 280 |
| | | 1.4003 | 3403 | 2599 | 1359 | 732 | 365 |
| | | 1.4301 | 3124 | 3104 | 1791 | 1172 | 691 |
| | | 1.4462 | 3951 | 3335 | 1725 | 941 | 451 |
| e = 474 mm | L4500 | S355 | 3279 | 3125 | 2540 | 2047 | 1273 |
| | | 1.4003 | 2435 | 2417 | 2347 | 2294 | 1496 |
| | | 1.4301 | 2172 | 2155 | 2084 | 2031 | 1995 |
| | | 1.4462 | 3297 | 2899 | 2265 | 2091 | 1438 |
| | L5100 | S355 | 3280 | 2800 | 2173 | 1609 | 918 |
| | | 1.4003 | 2436 | 2418 | 2348 | 1944 | 1121 |
| | | 1.4301 | 2173 | 2155 | 2085 | 1979 | 1731 |
| | | 1.4462 | 3005 | 2551 | 2101 | 1829 | 1194 |
| | L9000 | S355 | 2926 | 1602 | 955 | 550 | 278 |
| | | 1.4003 | 2436 | 2223 | 1287 | 716 | 362 |
| | | 1.4301 | 2171 | 2153 | 1621 | 1105 | 670 |
| | | 1.4462 | 3252 | 2719 | 1551 | 903 | 445 |

Austeniittis-ferriittinen ruostumaton terästä edustava teräslaji 1.4462, joka tunnetaan myös Duplexina, on teräslajeista suorituskykyisin paloluokissa R30 ja R60 ja se on niissä 60,8 % ja 78,8 % tapauksista kestävin mainitsemisjärjestyksessä. Sen suurin kilpailija on hiiliteräs, jonka kestävyys on keskimäärin suurempi kaikissa tapauksissa paitsi lyhyiden ja keskeisesti puristettujen liittopilarien tapauksessa.

Perinteistä hiiliterästä edustava teräslaji S355 pärjää puhtaasti kestävyytensä kannalta heikosti tässä sarjassa. Se on kestävyydeltään suurin ainoastaan pilarikorkeuksilla 4500 mm ja 5100 mm puristuksen vaikuttaessa keskeisesti. Hiiliteräksellä on kuitenkin selvä kilpailuetu hinnassa, jonka takia suuressa osassa Suomen liittopilareita on hiiliteräsprofiili.

Hiiliteräs maksaa noin yhden euron kilogramma. Valmiin teräsrakenteen kustannuksiin tulee lisätä vielä teräsrakenteeseen asennus- ja maalaustyö. Maalaustyö siltä osin, että vaikka liittopilariin ei yleensä ole yleensä tarpeellista palosuojata, niin hiiliteräs on esteettisesti vaatimatonta ja arkkitehdit ovat harvoin myötämielisiä sen käyttöön ilman pintakäsittelyä. Maalauksen hinta mitataan euroa neliömetriltä. Sivistyneenä arvauksena arvioidaan, että liittopilarin CHS 406,4x12,5 pilarikorkeudella 4500 mm maalattava alue on reilu yhdeksän neliometriä. Siihen kuluu n. kolme litraa maalia, arviolta 30 euroa litra. Lisäksi maalarilta tehtävään kuluu varmaankin tunti eli ehkä n. 50 euroa. Maalaustyö maksaisi näillä todella karkeilla arviolla 140 euroa. Pilari painaa 232 kg eli työn suorite-kustanne olisi 0,60 € / kg. Näillä hinnoilla yksi kilogramma hiiliteräsmateriaalia asennet-tuna ja maalattuna maksaisi 4,60 € / kg.

Tässä työssä käytetyistä ruostumattomista teräksistä ferriittinen ruostumaton teräslaji 1.4003 on edullisin, sillä se sisältää vain vähän nikkeliä. Nikkelin hinta maailmanmarkkinoilla on hyvin vaihtelevaa. Teräslajin 1.4003 karkea hinta-arvio on, että se maksaa noin kolme euroa kilogramma puhtaana materiaalina karkeasti arvioiden ja ottamalla huomioon maailmanmarkkinoiden pitkän aikavälin hintakehitystä nikkelin ja kuparin osalta. Sen asennuskustannukset ovat likimain samat kuin hiiliteräksellä, jolloin sen kokonais-hinnaksi tulee 6 € / kg. Austeniittisen ruostumattoman teräksen seokseen nikkeliä lisätään 8,0 – 10,5 % ja se ilmenee hankintahinnasta melko suoraan. Teräslajin 1.4301 materiaalin hankintakustannus on n. 3,50 € / kg. Yhteiskustannukset asennuksineen ovat karkeasti 6,50 € / kg. Duplexin hinta on joukon suurin. Siinä on sekä nikkeliä että kuparia, mutta myös molybdeenia. Sen materiaalihankintakustannukset ovat arviolta 5 € / kg ja kokonaiskustannukset olisivat 8 € / kg. Ruostumattomia teräksillä on parempi pitkäaikaikes-tävyys ja niitä ei välttämättä tarvitse maalata.

Karkeilla kustannusarvioilla käytettyjen ruostumattomien teräslajien 1.4003, 1.4301 ja 1.4462 hankinta- ja asennuskustannukset ovat hiiliteräkseen verrattuna 30 %, 41 % ja 74 % suuremmat mainitsemisjärjestyksessä. Paloluokissa R120, R180 tai R240 teräslajilla 1.4301 on mahdollista saada yhtä suuri korotus kestävyyteen kuin mitä hankintakustan-nukset nousevat. Yli 60 minuutin paloluokat ovat kuitenkin harvinaisia ja niitä saattaa

olla rakennuksissa yksittäisiä kappaleita. Tällaisia tapauksia on esimerkiksi merkittävien rakennusten, kuten sairaalan, pohjakerros, jossa vaaditaan kokonaisuudessa pidempää palonkestoa kuin yleensä. Lisäksi sairaaloissa saattaa olla polttoainevarastoja tai varavoi-makoneita, joilta vaaditaan sekä osastoitavuutta että rakenteellista kestävyyttä paloluokissa REI120 tai REI180. Ruostumattoman teräksen käyttö liittopilarin teräsprofiilina on suositeltavaa erityisin pitkillä palonkestoajoilla.

Valtaosa pilareista mitoitetaan rakenteellisen kestävyuden perusteella paloluokkaan R60. Tässä paloluokassa Duplex toimi loistavasti ja sallii liittopilarille kaikkein korkeimpia kestävyyskertoja. Toisaalta lisäämällä betoniraudoitusta ja muuttamalla profiilia siten, että sen kokonaisdimensiot kasvavat, mutta seinämävahvuus ja teräksen ainemäärä pienenee, on mahdollista päästä hiiliteräksellä kestävyydeltään vastaavaan lopputulokseen. Ruostumattoman teräksen käytölle liittopilarissa on oltava muitakin perusteita kuin hankintahinta, kuten arkkitehtoninen ulkonäkö. Ruostumattomasta teräksestä tehdyt liittopilarit ovat kyllä erinomainen ratkaisu teknisesti, mutta sen hinta on suuri haaste.

7. YHTEENVETO

Ruostumattoman teräksen käytölle liittopilarissa ei ole teknisiä esteitä ja usein sen suori-tuskyky on parempi kuin tavallisen hiiliteräksen. Sen kustannukset ovat usein liian kor-keat, ainakin mikäli uskomme vanhanaikaisia kustannusten arviointiperusteita. Poikkeuk-sena on pitkät palonkestoajat kuten paloluokat R120, R180 tai R240, joissa austeniittinen teräslaatu on merkittävästi kestävämpi kuin hiiliteräs. Austeniittisesta ruostumattomasta teräksestä valmistettu liittopilari on kilpailukykyinen vaihtoehto hiiliteräkselle, kun ote-taan huomioon sen koko elinkaaren aikana muodostuneet kustannukset sekä sen korke-ampi kestävyys. Tavanomaisessa R60 paloluokan rakennuksessa ruostumattomasta te-räsprofiilista valmistettu liittopilari voidaan todennäköisesti tehdä edullisemmin hiilite-räksestä. Pienissä paloluokissa vain mahdolliset ulkonäkökriteerit saattavat muodostaa tarpeen ruostumattomalle teräkselle.

Eurokoodi määrittää liittopilarin nurjahduspituudet palotilanteessa tapauksen mukaan ar-voihin 0,5 ja 0,7. Niiden todettiin olevan usein liian optimistisia ja epävarmalla puolella ainakin paloluokan R60 tapauksessa. Liittopilarin taivutusjäykkyys palotilanteessa ei pie-nene niin merkittävästi, että päädyttäisiin näihin tuloksiin. Ei edes paloluokassa R240. Paremmiin todellisuutta edustavat arvot olisivat 0,6 ja 0,8. Yleisesti liittopilarin mitoitus-essa on ajatus, että monikerrospilarin välipohjien tai yläpohjan epäkeskeisestä liitoksesta aiheutuva pistemomentti voidaan siirtää sen taivutusjäykkyyden pienentyessä. Taivutus-momentit siirtyvät taivutusjäykkyyksien suhteessa normaalilämpötilassa oleville pilarille. Väite, että taivutusmomentti voidaan siirtää kokonaisuudessaan, on myös hyvin optimis-tinen ja taivutusmomenttien uudelleen jakaantuminen tulisi suunnittelussa ottaa huomi-oon tarkemmin.

Liittopilarin kestävyys raudoittamattomana on suhteellisen korkea normaalilämpötilassa, mutta palotilanteessa pieni. Normaalilämpötilassa melko tavanomaisen raudoituksen li-sääminen liittopilariin tuottaa karkeasti 10 % lisäkestävyyden sekä puristus- että taivu-tusmomenttikestävyyteen. Vinon taivutuksen tapauksessa raudoituksesta aiheutuvat lisä-taivutusmomenttikestävyydet ovat vielä hieman suuremmat normaalilämpötilassa. Palo-tilanteessa vastaavan raudoituksen lisääminen tuottaa karkeasti 50 % suuremman puris-tuskestävyyden ja kolminkertaistaa taivutuskestävyyden. Palotilanteessa vinon taivutuk-sen kestävyys kasvavat raudoituksen myötä poikkileikkauksen mukaan viisi tai jopa kymmenen kertaiksi.

Lisätutkimuksia voitaisiin tehdä eri ruostumattomien teräksien toimivuudesta ja soveltu-vuudesta liittopilariin jatkamalla ja laajentamalla tätä tutkimusta. Lisäksi tarkempaa tut-kimusta vaatisi se, että millä austeniittisella teräslajilla saataisiin korkein suorituskyky liittopilarissa ottamalla huomioon sen korotetut kustannukset hiiliteräksen verrattuna.

LÄHTEET

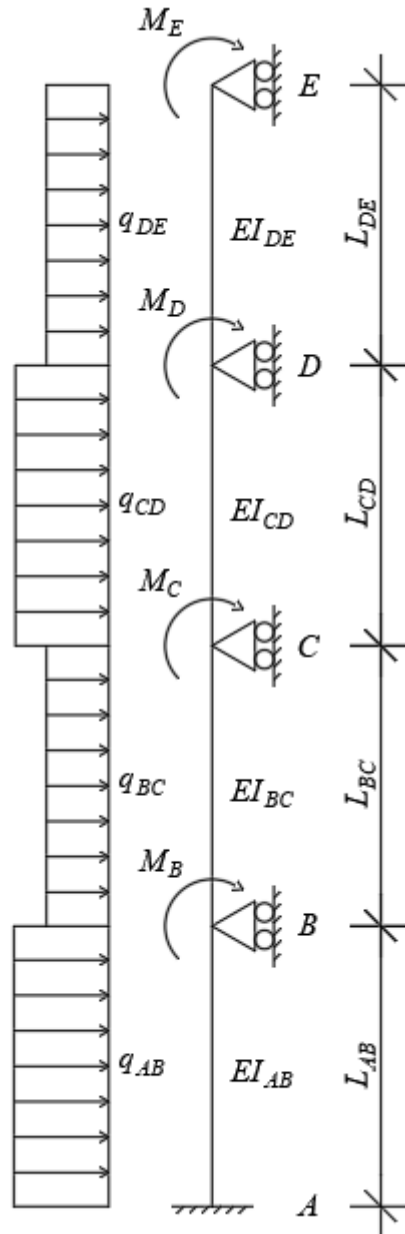
- [1] Taivalantti, K. Ruostumattoman teräksen käyttö rakentamisessa, Artikkel, Tampereen teknillinen Yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Tampere
- [2] SFS-ENV 1994-1-1. Eurokoodi 4: Betoni-teräs liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardisoimisliitto SFS, 1995
- [3] SFS-EN 1994-1-1. Eurokoodi 4: Betoni-teräs liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardisoimisliitto SFS, 2006
- [4] TRY/by58, Liittorakenteiden suunnittelu ja mitoitus Eurokoodi 4 – oppikirja. Suomen betoniyhdistys r.y. ja Teräsrakenneyhdistys r.y.
- [5] PG0917, Design and design of steel-concrete composite structures. Peikko Group Corporation 2017
- [6] Johnson, R.P., Composite Structures of Steel and Concrete. Beams, slabs, columns and frames for buildings. Third Edition. Blackwell Publishing 2004
- [7] NA SFS-EN 1994-1-2. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1994-1-2: Eurokoodi 4: Betoni-teräслиittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki 2007, Ympäristöministeriö
- [8] Wikipedia: Teräs [WWW] [Viitattu 27.2.2019]. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Ter%C3%A4s>
- [9] P413(2017), Design manual for structural stainless steel, 4th edition, SCI

- [10] SFS-EN 1993-1-4. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-4: Yleiset säännöt. Ruostumattomia teräksiä koskevat lisäsäännöt. Suomen standardisoimisliitto SFS, 2006
- [11] Rakennusteollisuus RT ry, RT-tiedote, ”Suomessa käytettäville betoniteräksille ja raudoitusverkoille otetaan käyttöön tyyppihyväksyntä – Jatko-tiedote täydentämään 8.3.2017 päivitettyä tiedotetta”, 2017
- [12] SFS-EN 1994-1-2. Eurokoodi 4: Betoni-teräs liittorakenteiden suunnit-telu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus. Suomen stan-dardisoimisliitto SFS, 2006
- [13] V., Sav, C., Campian, M., Senila, H., Constantinescu, ”Composite Steel-Concrete Columns with High Strength Concrete versus Normal Strength Concrete”, Acta Technica Napocensis, Civil Engineering & Architecture Vol. 54, No.1, Romania (2011)
- [14] S., El-Tawil, G., Deierlein, “Strength and Ductility of Concrete Encased Composite Column”, Journal of Structural Engineering, syyskuu 1999
- [15] T., Paloposti, L., Liedquist, “Steel emissivity at high temperatures”, VTT Research Notes 2299, Espoo 2005
- [16] F.M., Rodriques, A.L., Moreno jr, ”Temperature field of concrete-filled steel tubular columns in fire” REM, Int. Engineering journal 2017
- [17] G., Knor, R., Jaskulski, M.A., Glinicki, J., Holnicki-Szulc, ”Numerical identification of the thermal properties of early age concrete using in-verse heat transfer problem”, Springer Link Verkkojulkaisu, saatavilla ”<https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-018-2504-2>”, Syyskuu 2018, Viitattu 18.4.2019
- [18] T. Innos, ”Epäkeskeisesti puristetun liittopilarin siirtymä- ja jännitystil-an tutkiminen nurjahdustilanteessa eri laskentamenetelmillä”, Kandi-daatintyö, Tampereen teknillinen Yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Tampere
- [19] SFS-EN 1993-1-2. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus. Suomen standardisoimisliitto SFS, 2006

- [20] SFS-EN 1990. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen standardisoimisliitto SFS, 2006
- [21] J., Ding, Y.C., Wang, "Realistic modelling of thermal and structural behavior of unprotected concrete filled tubular columns in fire", Journal of Constructional Steel Research, lokakuu 2008
- [22] SFS-EN 1992-1-1. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardisoimisliitto SFS, 2005
- [23] SFS-EN 1993-1-1. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardisoimisliitto SFS, 2005
- [24] SFS-EN 1991-1-2. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset. Suomen standardisoimisliitto SFS, 2003
- [25] European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Composite Structures. The Construction Press, Lontoo 1981
- [26] SFS-EN 1992-1-2. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus. Suomen standardisoimisliitto SFS, 2005

LIITTEET

- Liite 1 Monikerrospilarin taivutusmomenttikuvaajat momentin vaikuttaessa alempiin välipohjiin tai vaakakuorman vaikuttaessa alempiin kerrosväleihin. Laskenta on suoritettu siirtymämenetelmällä.
- Liite 2 Monikerrospilarin nurjahduskuormat ja -muodot, kun sitä rasittaa yläpohjalta pistekuorma. Laskenta on suoritettu stabiilisuusteorian momenttime-
netelmällä ja vertailuarvot sekä nurjahdusmuodot on laskettu ohjelmistolla ANSYS.
- Liite 3 Raudoitustankoryhmän plastinen taivutusvastusresultantti vinossa taivutuksessa, kun tangot on sijoitettu symmetrisesti neliöprofiilin kulmiin ja taivutusneutraaliakseli kiertyy liittopilarin korkeusakselin ympäri.
- Liite 4 Kestävyyslaskelmat profiilille CHS 406,4x12,5, raudoituksella 8T25 ja pilarin korkeuden ollessa 4500 mm.
- Liite 5 Kestävyyslaskelmat taulukoituina muille poikkileikkauksille kuin liitteen 4 profiileille.



Merkitään

$$AL = \frac{EI_{AB}}{L_{AB}} \quad BL = \frac{EI_{BC}}{L_{BC}} \quad CL = \frac{EI_{CD}}{L_{CD}} \quad DL = \frac{EI_{DE}}{L_{DE}}$$

$$AQ = \frac{q_{AB} \cdot L_{AB}^2}{12} \quad BQ = \frac{q_{BC} \cdot L_{BC}^2}{12} \quad CQ = \frac{q_{CD} \cdot L_{CD}^2}{12} \quad DQ = \frac{q_{DE} \cdot L_{DE}^2}{12}$$

Tuntemattomat ovat

$$\theta_{AB} = \theta_A = 0$$

$$\theta_{BA} = \theta_B = \theta_{BC}$$

$$\theta_{CB} = \theta_C = \theta_{CD}$$

$$\theta_{DC} = \theta_D = \theta_{DE}$$

$$\theta_{ED} = \theta_E$$

$$\vec{\theta} = \begin{pmatrix} M_A \\ \theta_B \\ \theta_C \\ \theta_D \\ \theta_E \end{pmatrix}$$

$$M_{AB} = 2AL \cdot (\theta_B) + AQ$$

$$M_{BA} = 2AL \cdot (2\theta_B) + AQ$$

$$M_{BC} = 2BL \cdot (2\theta_B + \theta_C) + BQ$$

$$M_{CB} = 2BL \cdot (\theta_B + 2\theta_C) + BQ$$

$$M_{CD} = 2CL \cdot (2\theta_C + \theta_D) + CQ$$

$$M_{DC} = 2CL \cdot (\theta_C + 2\theta_D) + CQ$$

$$M_{DE} = 2DL \cdot (2\theta_D + \theta_E) + DQ$$

$$M_{ED} = 2DL \cdot (\theta_D + 2\theta_E) + DQ$$

$$\rightarrow M_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & -2AL & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4AL & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4BL & -2BL & 0 & 0 \\ 0 & 2BL & 4BL & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4CL & -2CL & 0 \\ 0 & 0 & 2CL & 4CL & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4DL & -2DL \\ 0 & 0 & 0 & 2DL & 4DL \end{pmatrix} \cdot \vec{\theta} + \begin{pmatrix} AQ \\ AQ \\ BQ \\ BQ \\ CQ \\ CQ \\ DQ \\ DQ \end{pmatrix}$$

Pilarin tasapainoyhtälöt ovat

$$M_A + M_{AB} = 0$$

$$M_{BA} + M_B + M_{BC} = 0$$

$$M_{CB} + M_C + M_{CD} = 0$$

$$M_{DC} + M_D + M_{DE} = 0$$

$$M_{ED} + M_E = 0$$

Pilarin tasapainoyhtälöt matriisimuodossa

$$\begin{pmatrix} 1 & 2AL & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4AL + 4BL & 2BL & 0 & 0 \\ 0 & 2BL & 4BL + 4CL & 2CL & 0 \\ 0 & 0 & 2CL & 4CL + 4DL & 2DL \\ 0 & 0 & 0 & 2DL & 4DL \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_A \\ \theta_B \\ \theta_C \\ \theta_D \\ \theta_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -AQ \\ -M_B - BQ + AQ \\ -M_C - CQ + BQ \\ -M_D - DQ + CQ \\ -M_E + DQ \end{pmatrix}$$

Tuntemattomat ratkeavat matriisin kääntämisellä seuraavasti

$$\begin{pmatrix} M_A \\ \theta_B \\ \theta_C \\ \theta_D \\ \theta_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2AL & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4AL + 4BL & 2BL & 0 & 0 \\ 0 & 2BL & 4BL + 4CL & 2CL & 0 \\ 0 & 0 & 2CL & 4CL + 4DL & 2DL \\ 0 & 0 & 0 & 2DL & 4DL \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -AQ \\ -M_B - BQ + AQ \\ -M_C - CQ + BQ \\ -M_D - DQ + CQ \\ -M_E + DQ \end{pmatrix}$$

Sijoittamalla ratkaisu yhtään **M_{ij}** saadaan sauvanpäämomentit

$$\rightarrow M_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & -2AL & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4AL & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4BL & -2BL & 0 & 0 \\ 0 & 2BL & 4BL & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4CL & -2CL & 0 \\ 0 & 0 & 2CL & 4CL & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4DL & -2DL \\ 0 & 0 & 0 & 2DL & 4DL \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_A \\ \theta_B \\ \theta_C \\ \theta_D \\ \theta_E \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} AQ \\ AQ \\ BQ \\ BQ \\ CQ \\ CQ \\ DQ \\ DQ \end{pmatrix}$$

Asettamalla vertailuarvot seuraavasti on kyseessä kuvan 2.2(a) tilanne

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 1 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} -1 \\ 0.268 \\ 0.268 \\ -0.072 \\ -0.072 \\ 0.021 \\ 0.021 \\ -0.01 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.2(b) tilanne

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 0.15 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 1 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} -1 \\ 0.443 \\ 0.443 \\ -0.119 \\ -0.119 \\ 0.034 \\ 0.034 \\ -0.017 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.2(c) tilanne

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 1 & CL := 0.15 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 1 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} -1 \\ 0.081 \\ 0.081 \\ -0.036 \\ -0.036 \\ 0.01 \\ 0.01 \\ -0.005 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.2(d) tilanne

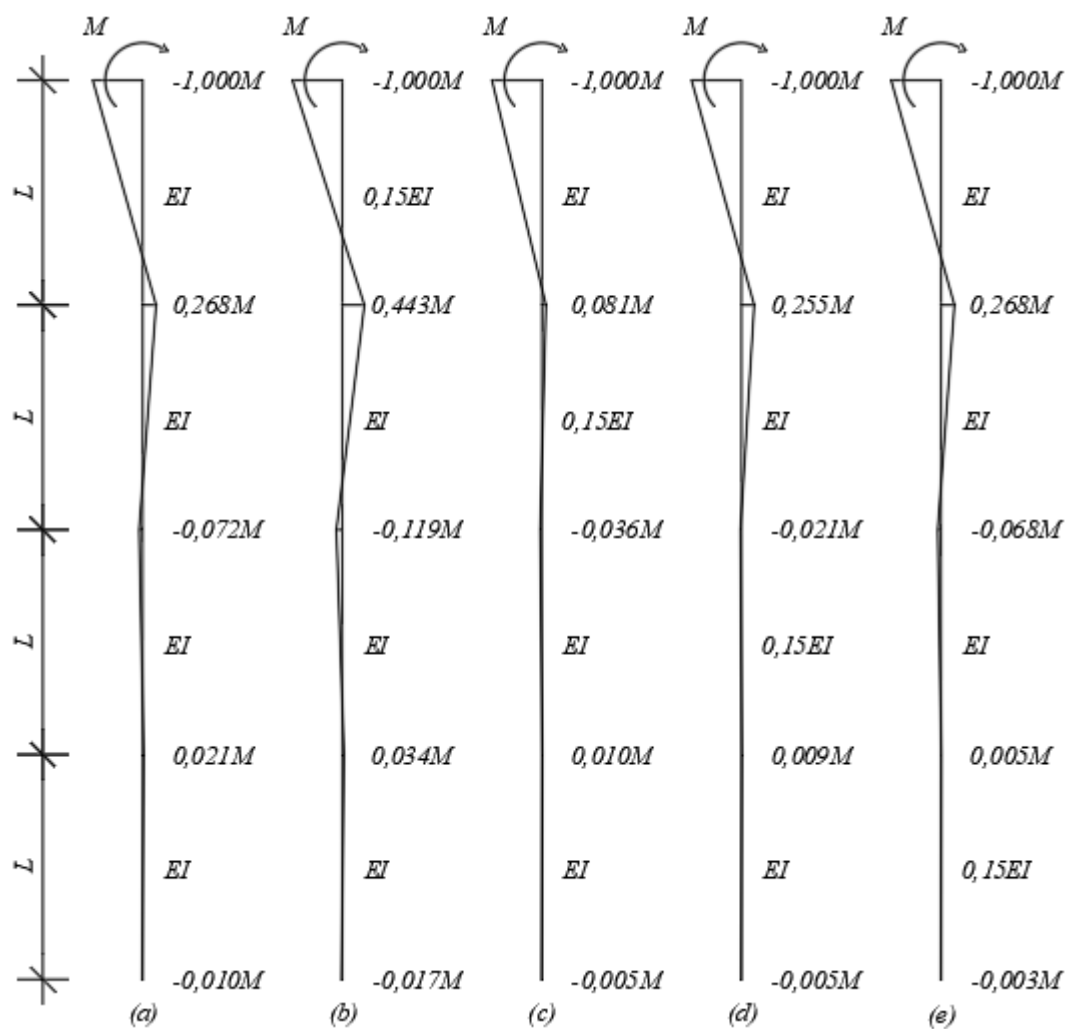
$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 0.15 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 1 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} -1 \\ 0.255 \\ 0.255 \\ -0.021 \\ -0.021 \\ 0.009 \\ 0.009 \\ -0.005 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.2(e) tilanne

$$\begin{array}{llllll} AL := 0.15 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 1 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} -1 \\ 0.267 \\ 0.267 \\ -0.068 \\ -0.068 \\ 0.006 \\ 0.006 \\ -0.003 \end{pmatrix}$$



Kuvan 2.3(a) tilanne

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 1 & M_E := 0 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.464 \\ -0.536 \\ 0.144 \\ 0.144 \\ -0.041 \\ -0.041 \\ 0.021 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.3(b) tilanne

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 0.15 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 1 & M_E := 0 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.115 \\ -0.885 \\ 0.238 \\ 0.238 \\ -0.068 \\ -0.068 \\ 0.034 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.3(c) tilanne

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 1 & CL := 0.15 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 1 & M_E := 0 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.838 \\ -0.162 \\ 0.072 \\ 0.072 \\ -0.02 \\ -0.02 \\ 0.01 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.3(d) tilanne

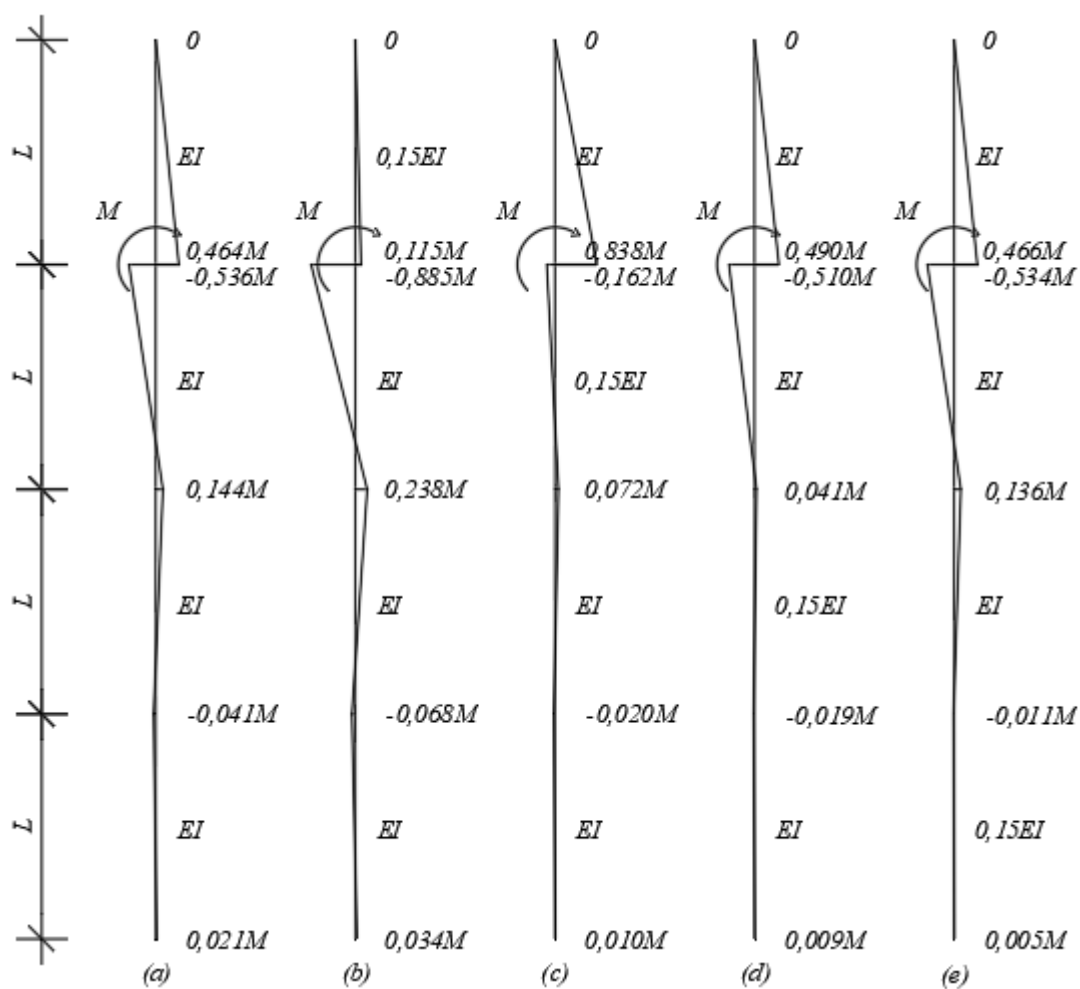
$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 0.15 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 1 & M_E := 0 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.49 \\ -0.51 \\ 0.041 \\ 0.041 \\ -0.019 \\ -0.019 \\ 0.009 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.3(e) tilanne

$$\begin{array}{llllll} AL := 0.15 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 1 & M_E := 0 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.466 \\ -0.534 \\ 0.136 \\ 0.136 \\ -0.011 \\ -0.011 \\ 0.006 \end{pmatrix}$$



Tilanne, jossa momentti on pisteessä C

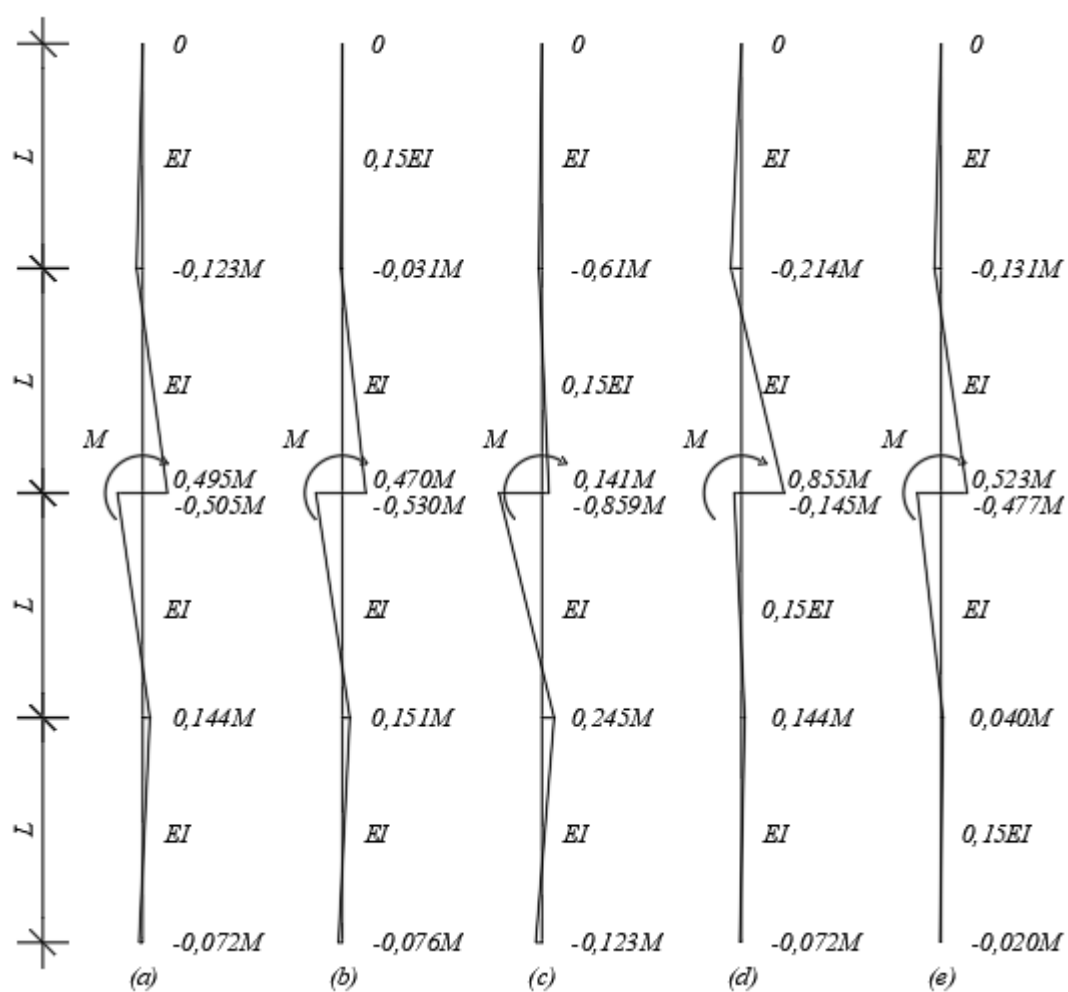
$$\begin{array}{llllll}
 AL := 1 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 1 \\
 AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0
 \end{array}
 \quad M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.124 \\ -0.124 \\ 0.495 \\ -0.505 \\ 0.144 \\ 0.144 \\ -0.072 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{llllll}
 AL := 1 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 0.15 & M_B := 0 & M_C := 1 \\
 AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0
 \end{array}
 \quad M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.031 \\ -0.031 \\ 0.47 \\ -0.53 \\ 0.151 \\ 0.151 \\ -0.076 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{llllll}
 AL := 1 & BL := 1 & CL := 0.15 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 1 \\
 AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0
 \end{array}
 \quad M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.061 \\ -0.061 \\ 0.141 \\ -0.859 \\ 0.245 \\ 0.245 \\ -0.123 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{llllll}
 AL := 1 & BL := 0.15 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 1 \\
 AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0
 \end{array}
 \quad M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.214 \\ -0.214 \\ 0.855 \\ -0.145 \\ 0.065 \\ 0.065 \\ -0.033 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{llllll}
 AL := 0.15 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 1 \\
 AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0
 \end{array}
 \quad M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.131 \\ -0.131 \\ 0.523 \\ -0.477 \\ 0.04 \\ 0.04 \\ -0.02 \end{pmatrix}$$



Tilanne, jossa momentti on pisteessä B

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 1 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.031 \\ 0.031 \\ -0.124 \\ -0.124 \\ 0.464 \\ -0.536 \\ 0.268 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 0.15 & M_B := 1 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.008 \\ 0.008 \\ -0.117 \\ -0.117 \\ 0.462 \\ -0.538 \\ 0.269 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 1 & CL := 0.15 & DL := 1 & M_B := 1 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0 \end{array}$$

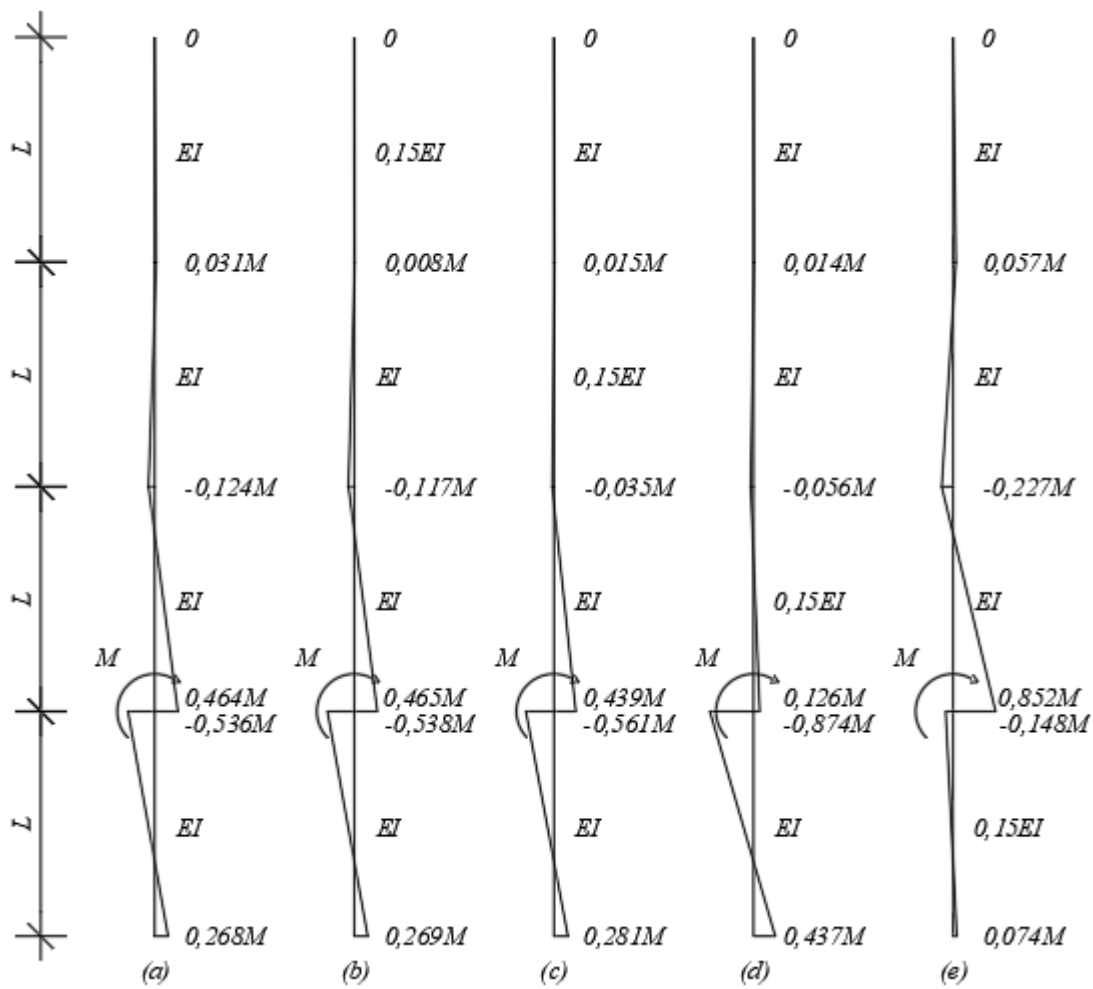
$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.015 \\ 0.015 \\ -0.035 \\ -0.035 \\ 0.439 \\ -0.561 \\ 0.281 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 0.15 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 1 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.014 \\ 0.014 \\ -0.056 \\ -0.056 \\ 0.126 \\ -0.874 \\ 0.437 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{llllll} AL := 0.15 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 1 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 0 & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0 \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.057 \\ 0.057 \\ -0.227 \\ -0.227 \\ 0.852 \\ -0.148 \\ 0.074 \end{pmatrix}$$



Tilanne, jossa tasainen vaakakuorma on välillä DE eli kuva 2.4(a) tilanne.

s. 11/18

Väliarvot voidaan laskea esim. yksiaukkoisen palkin tilaneella, jossa molemmissa päissä on pystytuki ja toisessa myös vaakatuki ja sitä kuormittaa tasainen kuorma, sekä lasketut momentit päissä.

$$\begin{aligned} AL &:= 1 & BL &:= 1 & CL &:= 1 & DL &:= 1 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 0 & BQ &:= 0 & CQ &:= 0 & DQ &:= 12^{-1} & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_1 - M_0 + \frac{1}{2} = 0.433$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_0 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.094$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.067 \\ -0.067 \\ 0.018 \\ 0.018 \\ -0.005 \\ -0.005 \\ 0.003 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.4(b) tilanne

$$\begin{aligned} AL &:= 1 & BL &:= 1 & CL &:= 1 & DL &:= 0.15 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 0 & BQ &:= 0 & CQ &:= 0 & DQ &:= 12^{-1} & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_1 - M_0 + \frac{1}{2} = 0.389$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_0 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.076$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.111 \\ -0.111 \\ 0.03 \\ 0.03 \\ -0.009 \\ -0.009 \\ 0.004 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.4(c) tilanne

$$\begin{aligned} AL &:= 1 & BL &:= 1 & CL &:= 0.15 & DL &:= 1 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 0 & BQ &:= 0 & CQ &:= 0 & DQ &:= 12^{-1} & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_1 - M_0 + \frac{1}{2} = 0.48$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_0 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.115$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.02 \\ -0.02 \\ 0.009 \\ 0.009 \\ -0.003 \\ -0.003 \\ 0.001 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.4(d) tilanne

$$\begin{aligned} AL &:= 1 & BL &:= 0.15 & CL &:= 1 & DL &:= 1 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 0 & BQ &:= 0 & CQ &:= 0 & DQ &:= 12^{-1} & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_1 - M_0 + \frac{1}{2} = 0.436$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_0 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.095$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.064 \\ -0.064 \\ 0.005 \\ 0.005 \\ -0.002 \\ -0.002 \\ 0.001 \end{pmatrix}$$

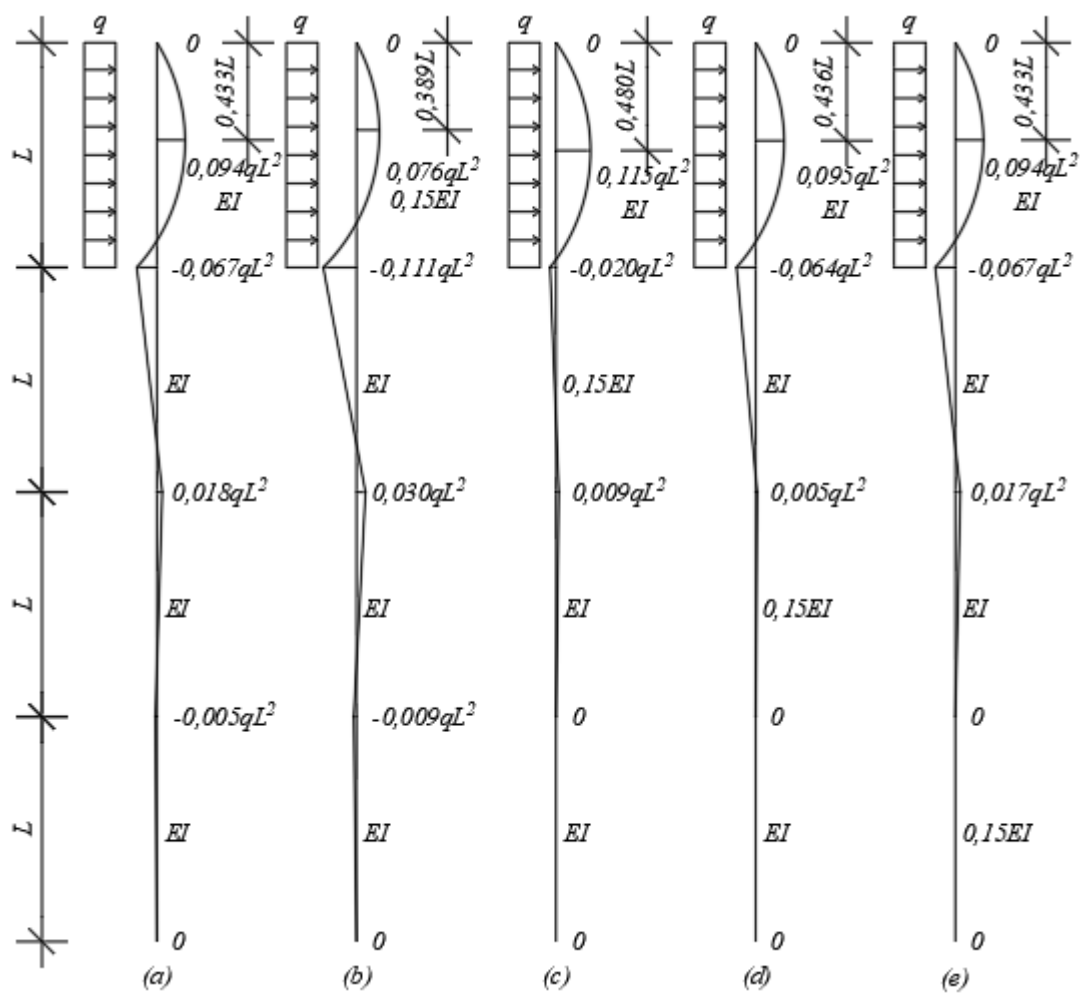
Kuvan 2.4(e) tilanne

$$\begin{aligned} AL &:= 0.15 & BL &:= 1 & CL &:= 1 & DL &:= 1 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 0 & BQ &:= 0 & CQ &:= 0 & DQ &:= 12^{-1} & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_1 - M_0 + \frac{1}{2} = 0.433$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_0 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.094$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.067 \\ -0.067 \\ 0.017 \\ 0.017 \\ -0.001 \\ -0.001 \\ 0.001 \end{pmatrix}$$



Kuvan 2.5(a) tilanne

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 12^{-1} & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0 \end{array}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_3 - M_2 + \frac{1}{2} = 0.495$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_2 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.073$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.049 \\ -0.049 \\ -0.054 \\ -0.054 \\ 0.015 \\ 0.015 \\ -0.008 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.5(b) tilanne

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 0.15 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 12^{-1} & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0 \end{array}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_3 - M_2 + \frac{1}{2} = 0.448$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_2 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.088$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.012 \\ -0.012 \\ -0.064 \\ -0.064 \\ 0.018 \\ 0.018 \\ -0.009 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.5(c) tilanne

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 1 & CL := 0.15 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 12^{-1} & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0 \end{array}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_3 - M_2 + \frac{1}{2} = 0.497$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_2 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.049$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.075 \\ -0.075 \\ -0.078 \\ -0.078 \\ 0.022 \\ 0.022 \\ -0.011 \end{pmatrix}$$

Kuvan 2.5(d) tilanne

$$\begin{array}{llllll} AL := 1 & BL := 0.15 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 12^{-1} & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0 \end{array}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_3 - M_2 + \frac{1}{2} = 0.543$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_2 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.089$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.059 \\ -0.059 \\ -0.016 \\ -0.016 \\ 0.007 \\ 0.007 \\ -0.003 \end{pmatrix}$$

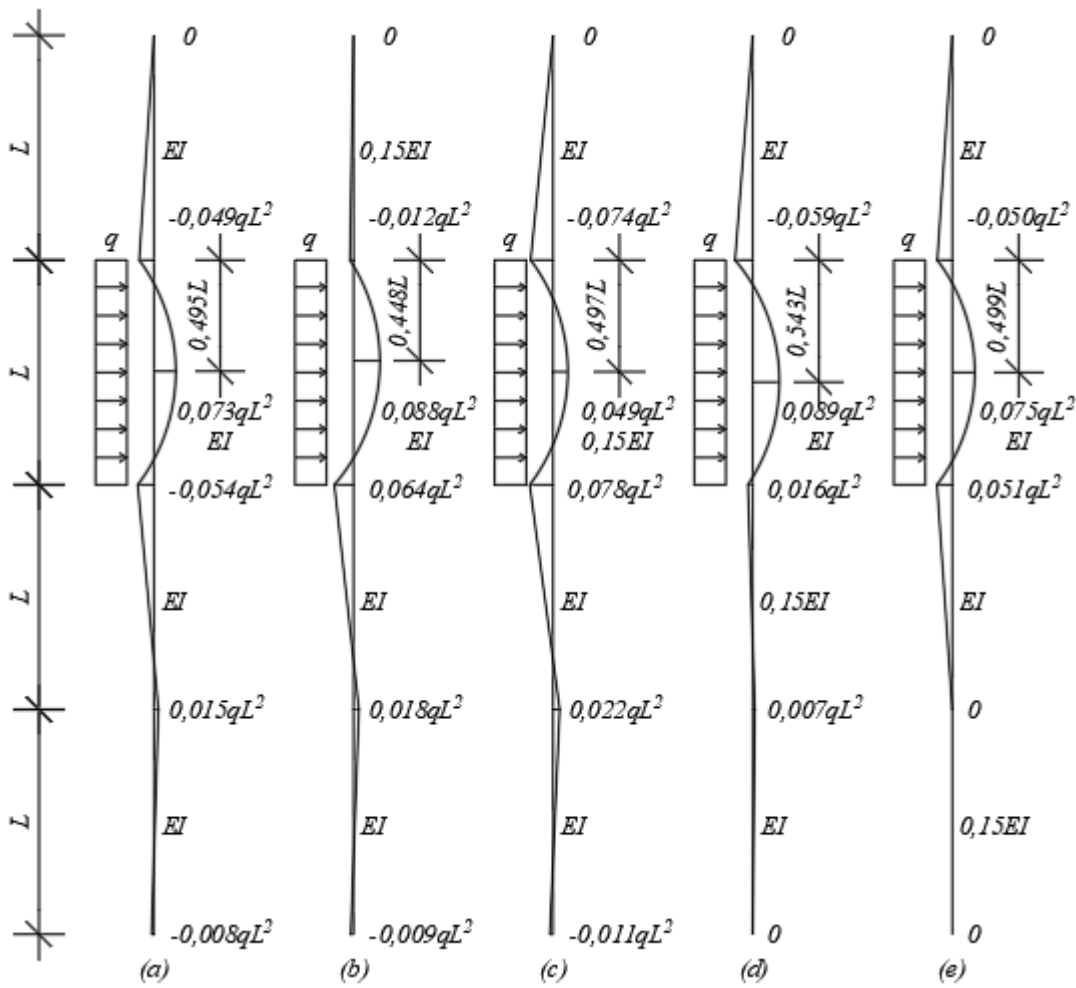
Kuvan 2.5(e) tilanne

$$\begin{array}{llllll} AL := 0.15 & BL := 1 & CL := 1 & DL := 1 & M_B := 0 & M_C := 0 \\ AQ := 0 & BQ := 0 & CQ := 12^{-1} & DQ := 0 & M_D := 0 & M_E := 0 \end{array}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_3 - M_2 + \frac{1}{2} = 0.499$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_2 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.075$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.05 \\ -0.05 \\ -0.051 \\ -0.051 \\ 0.004 \\ 0.004 \\ -0.002 \end{pmatrix}$$



Tilanne, jossa tasainen kuorma on kerrosvälillä BC

$$\begin{aligned} AL &:= 1 & BL &:= 1 & CL &:= 1 & DL &:= 1 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 0 & BQ &:= 12^{-1} & CQ &:= 0 & DQ &:= 0 & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_5 - M_4 + \frac{1}{2} = 0.495$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_4 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.071$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.013 \\ 0.013 \\ -0.052 \\ -0.052 \\ -0.057 \\ -0.057 \\ 0.028 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} AL &:= 1 & BL &:= 1 & CL &:= 1 & DL &:= 0.15 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 0 & BQ &:= 12^{-1} & CQ &:= 0 & DQ &:= 0 & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_3 - M_2 + \frac{1}{2} = 0.448$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_4 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.051$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.003 \\ 0.003 \\ -0.049 \\ -0.049 \\ -0.057 \\ -0.057 \\ 0.029 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} AL &:= 1 & BL &:= 1 & CL &:= 0.15 & DL &:= 1 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 0 & BQ &:= 12^{-1} & CQ &:= 0 & DQ &:= 0 & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_5 - M_4 + \frac{1}{2} = 0.447$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_4 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.085$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.006 \\ 0.006 \\ -0.015 \\ -0.015 \\ -0.067 \\ -0.067 \\ 0.034 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} AL &:= 1 & BL &:= 0.15 & CL &:= 1 & DL &:= 1 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 0 & BQ &:= 12^{-1} & CQ &:= 0 & DQ &:= 0 & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_5 - M_4 + \frac{1}{2} = 0.498$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_4 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.048$$

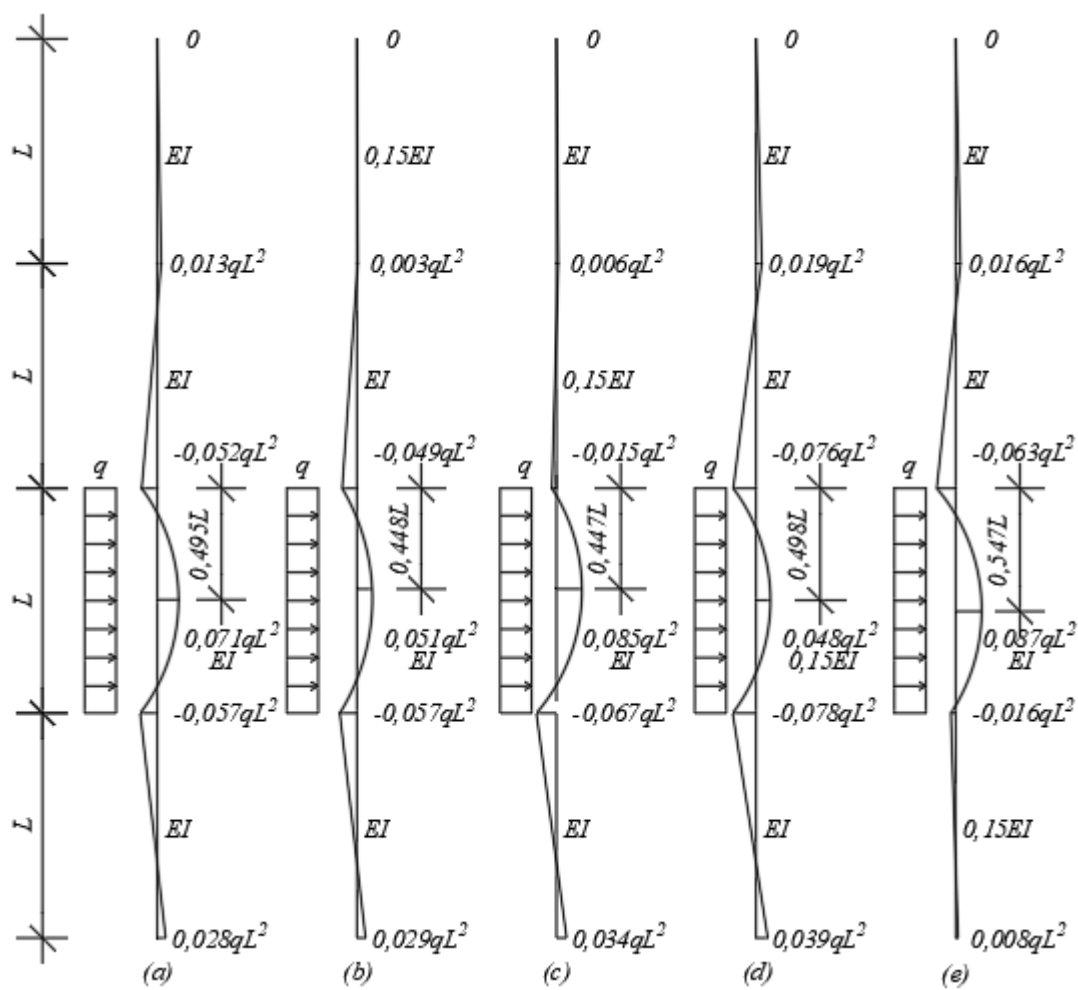
$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.019 \\ 0.019 \\ -0.076 \\ -0.076 \\ -0.078 \\ -0.078 \\ 0.039 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} AL &:= 0.15 & BL &:= 1 & CL &:= 1 & DL &:= 1 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 0 & BQ &:= 12^{-1} & CQ &:= 0 & DQ &:= 0 & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_5 - M_4 + \frac{1}{2} = 0.547$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_4 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.087$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.016 \\ 0.016 \\ -0.063 \\ -0.063 \\ -0.016 \\ -0.016 \\ 0.008 \end{pmatrix}$$



Tilanne, jossa tasainen kuorma on kerrosvälillä BC

$$\begin{aligned} AL &:= 1 & BL &:= 1 & CL &:= 1 & DL &:= 1 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 12^{-1} & BQ &:= 0 & CQ &:= 0 & DQ &:= 0 & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_7 - M_6 + \frac{1}{2} = 0.433$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_6 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.055$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.003 \\ -0.003 \\ 0.01 \\ 0.01 \\ -0.039 \\ -0.039 \\ -0.106 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} AL &:= 1 & BL &:= 1 & CL &:= 1 & DL &:= 0.15 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 12^{-1} & BQ &:= 0 & CQ &:= 0 & DQ &:= 0 & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_7 - M_6 + \frac{1}{2} = 0.433$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_6 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.055$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.001 \\ -0.001 \\ 0.01 \\ 0.01 \\ -0.039 \\ -0.039 \\ -0.106 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} AL &:= 1 & BL &:= 1 & CL &:= 0.15 & DL &:= 1 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 12^{-1} & BQ &:= 0 & CQ &:= 0 & DQ &:= 0 & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_7 - M_6 + \frac{1}{2} = 0.43$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_6 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.056$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.001 \\ -0.001 \\ 0.003 \\ 0.003 \\ -0.037 \\ -0.037 \\ -0.107 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} AL &:= 1 & BL &:= 0.15 & CL &:= 1 & DL &:= 1 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 12^{-1} & BQ &:= 0 & CQ &:= 0 & DQ &:= 0 & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_7 - M_6 + \frac{1}{2} = 0.391$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_6 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.066$$

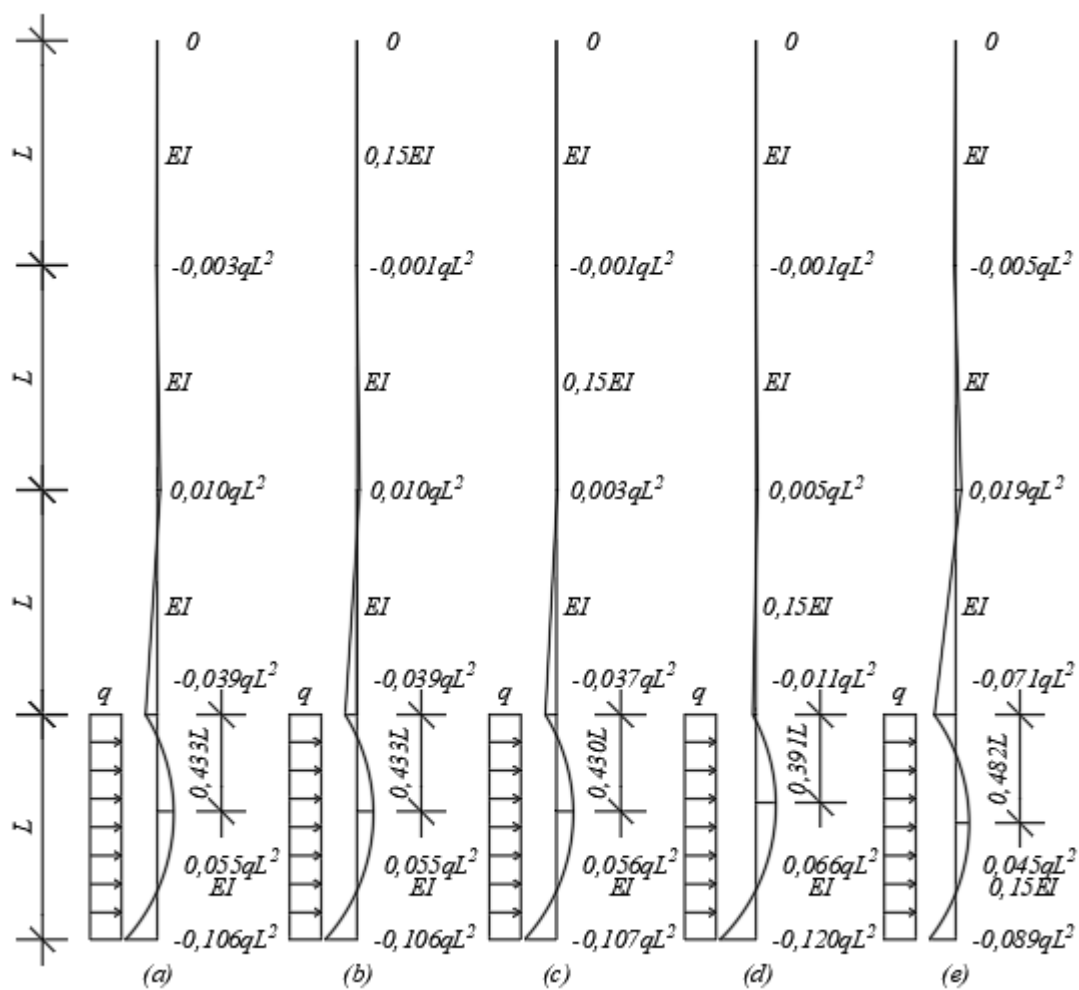
$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.001 \\ -0.001 \\ 0.005 \\ 0.005 \\ -0.011 \\ -0.011 \\ -0.12 \end{pmatrix}$$

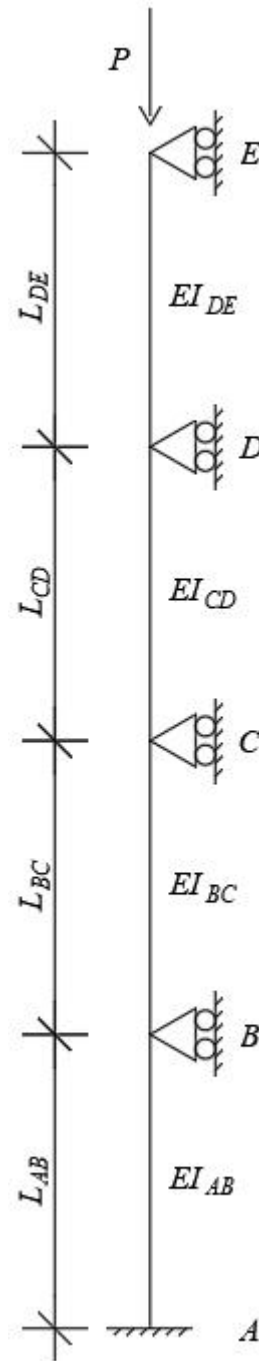
$$\begin{aligned} AL &:= 0.15 & BL &:= 1 & CL &:= 1 & DL &:= 1 & M_B &:= 0 & M_C &:= 0 \\ AQ &:= 12^{-1} & BQ &:= 0 & CQ &:= 0 & DQ &:= 0 & M_D &:= 0 & M_E &:= 0 \end{aligned}$$

$$\text{Maksimin kohta} \quad L_{\max} := M_7 - M_6 + \frac{1}{2} = 0.482$$

$$\text{Maksimin arvo} \quad M := M_6 + \frac{1}{2} \cdot (L_{\max})^2 = 0.045$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.005 \\ -0.005 \\ 0.019 \\ 0.019 \\ -0.071 \\ -0.071 \\ -0.089 \end{pmatrix}$$





Sauvanpääkiertymät ovat

$$\varphi_{ED} = \alpha_{ED} \cdot M_{ED} - \beta_{ED} \cdot M_{DE}$$

$$\varphi_{DE} = \alpha_{DE} \cdot M_{DE} - \beta_{DE} \cdot M_{ED}$$

$$\varphi_{DC} = \alpha_{DC} \cdot M_{DC} - \beta_{DC} \cdot M_{CD}$$

$$\varphi_{CD} = \alpha_{CD} \cdot M_{CD} - \beta_{CD} \cdot M_{DC}$$

$$\varphi_{CB} = \alpha_{CB} \cdot M_{CB} - \beta_{CB} \cdot M_{BC}$$

$$\varphi_{BC} = \alpha_{BC} \cdot M_{BC} - \beta_{BC} \cdot M_{CB}$$

$$\varphi_{BA} = \alpha_{BA} \cdot M_{BA} - \beta_{BA} \cdot M_{AB}$$

$$\varphi_{AB} = \alpha_{AB} \cdot M_{AB} - \beta_{AB} \cdot M_{BA}$$

$$\begin{aligned}
\varphi_{AB} &= 0 & \varphi_{BA} &= \varphi_{BC} & \varphi_{CB} &= \varphi_{CD} & \varphi_{DC} &= \varphi_{DE} \\
M_{ED} &= 0 & M_{BA} &= -M_{BC} & M_{CB} &= -M_{CD} & M_{DC} &= -M_{DE} \\
\alpha_{ij} &= \frac{L_{ij}}{3EI_{ij}} \psi(k_{ij} \cdot L_{ij}) = \alpha_{ji} & \psi(k_{ij} \cdot L_{ij}) &= \frac{3}{k_{ij} \cdot L_{ij}} \cdot \left(\frac{1}{k_{ij} \cdot L_{ij}} - \frac{1}{\tan(k_{ij} \cdot L_{ij})} \right) \\
\beta_{ij} &= \frac{L_{ij}}{6EI_{ij}} \phi(k_{ij} \cdot L_{ij}) = \beta_{ji} & \phi(k_{ij} \cdot L_{ij}) &= \frac{6}{k_{ij} \cdot L_{ij}} \cdot \left(\frac{1}{\sin(k_{ij} \cdot L_{ij})} - \frac{1}{k_{ij} \cdot L_{ij}} \right)
\end{aligned}$$

Yhtälöt sievenevät muotoon

$$\begin{aligned}
\alpha_{AB} \cdot M_{AB} - \beta_{AB} \cdot M_{BA} &= 0 & M_{DE} + M_{DC} &= 0 \\
\alpha_{CD} \cdot M_{DC} - \beta_{CD} \cdot M_{CD} - \alpha_{DE} \cdot M_{DE} + 0 &= 0 & M_{CD} + M_{CB} &= 0 \\
\alpha_{BC} \cdot M_{CB} - \beta_{BC} \cdot M_{BC} - \alpha_{CD} \cdot M_{CD} + \beta_{CD} \cdot M_{DC} &= 0 & M_{BC} + M_{BA} &= 0 \\
\alpha_{BA} \cdot M_{BA} - \beta_{BA} \cdot M_{AB} - \alpha_{BC} \cdot M_{BC} + \beta_{BC} \cdot M_{CB} &= 0
\end{aligned}$$

Eli

$$\begin{pmatrix}
-\alpha_{DE} & \alpha_{CD} & -\beta_{CD} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \beta_{CD} & -\alpha_{CD} & \alpha_{BC} & -\beta_{BC} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \beta_{BC} & -\alpha_{BC} & \alpha_{AB} & -\beta_{AB} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{AB} & \alpha_{AB} \\
1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0
\end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_{DE} \\ M_{DC} \\ M_{CD} \\ M_{CB} \\ M_{BC} \\ M_{BA} \\ M_{AB} \end{pmatrix} = \vec{0}$$

Nurahduskuormat löytyvät yhtälöryhmän ei-triviaalista ratkaisusta

$$\left| \begin{pmatrix}
-\alpha_{DE} & \alpha_{CD} & -\beta_{CD} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \beta_{CD} & -\alpha_{CD} & \alpha_{BC} & -\beta_{BC} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \beta_{BC} & -\alpha_{BC} & \alpha_{AB} & -\beta_{AB} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{AB} & \alpha_{AB} \\
1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0
\end{pmatrix} \right| = 0$$

Merkitään:

$$\alpha_{AB}(P) := \frac{1}{EI_{AB} \cdot \sqrt{\frac{P}{EI_{AB}}}} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{P}{EI_{AB}}}} - \frac{1}{\tan\left(\sqrt{\frac{P}{EI_{AB}}} \cdot L_{AB}\right)} \right)$$

$$\alpha_{BC}(P) := \frac{1}{EI_{BC} \cdot \sqrt{\frac{P}{EI_{BC}}}} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{P}{EI_{BC}}}} - \frac{1}{\tan\left(\sqrt{\frac{P}{EI_{BC}}} \cdot L_{BC}\right)} \right)$$

$$\alpha_{CD}(P) := \frac{1}{EI_{CD} \cdot \sqrt{\frac{P}{EI_{CD}}}} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{P}{EI_{CD}}}} - \frac{1}{\tan\left(\sqrt{\frac{P}{EI_{CD}}} \cdot L_{CD}\right)} \right)$$

$$\alpha_{DE}(P) := \frac{1}{EI_{DE} \cdot \sqrt{\frac{P}{EI_{DE}}}} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{P}{EI_{DE}}}} - \frac{1}{\tan\left(\sqrt{\frac{P}{EI_{DE}}} \cdot L_{DE}\right)} \right)$$

$$\beta_{AB}(P) := \frac{1}{EI_{AB} \cdot \sqrt{\frac{P}{EI_{AB}}}} \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\sqrt{\frac{P}{EI_{AB}}} \cdot L_{AB}\right)} - \frac{1}{\sqrt{\frac{P}{EI_{AB}}} \cdot L_{AB}} \right)$$

$$\beta_{BC}(P) := \frac{1}{EI_{BC} \cdot \sqrt{\frac{P}{EI_{BC}}}} \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\sqrt{\frac{P}{EI_{BC}}} \cdot L_{BC}\right)} - \frac{1}{\sqrt{\frac{P}{EI_{BC}}} \cdot L_{BC}} \right)$$

$$\beta_{CD}(P) := \frac{1}{EI_{CD} \cdot \sqrt{\frac{P}{EI_{CD}}}} \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\sqrt{\frac{P}{EI_{CD}}} \cdot L_{CD}\right)} - \frac{1}{\sqrt{\frac{P}{EI_{CD}}} \cdot L_{CD}} \right)$$

$$\beta_{DE}(P) := \frac{1}{EI_{DE} \cdot \sqrt{\frac{P}{EI_{DE}}}} \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\sqrt{\frac{P}{EI_{DE}}} \cdot L_{DE}\right)} - \frac{1}{\sqrt{\frac{P}{EI_{DE}}} \cdot L_{DE}} \right)$$

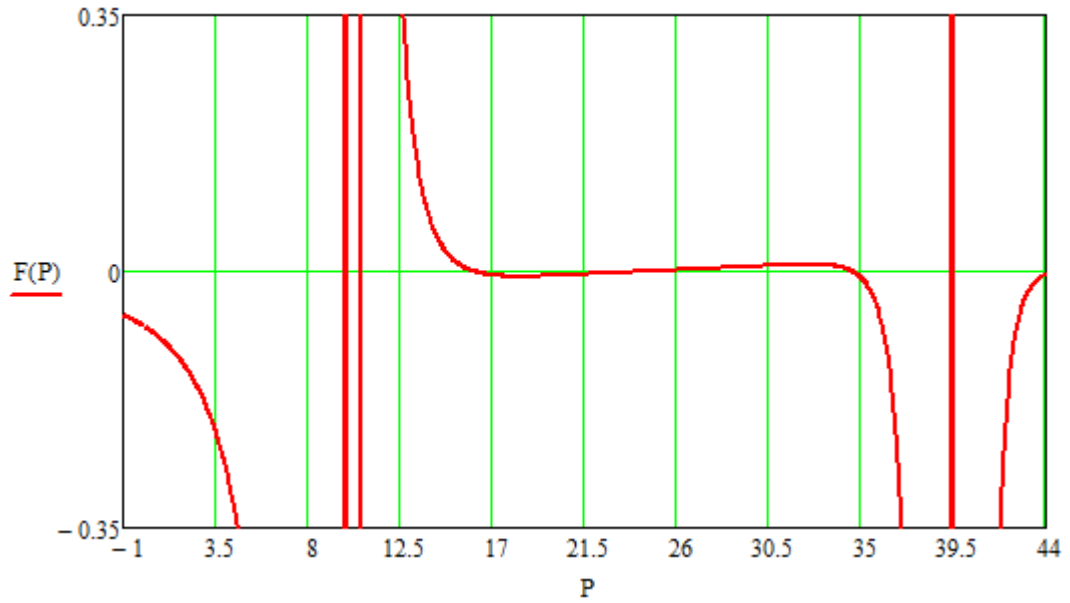
Ja merkitään determinanttia funktiona F

$$F(P) := \begin{vmatrix} -\alpha_{DE}(P) & \alpha_{CD}(P) & -\beta_{CD}(P) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{CD}(P) & -\alpha_{CD}(P) & \alpha_{BC}(P) & -\beta_{BC}(P) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_{BC}(P) & -\alpha_{BC}(P) & \alpha_{AB}(P) & -\beta_{AB}(P) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{AB}(P) & \alpha_{AB}(P) \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Asettamalla vertailuarvot seuraavasti on kyseessä normaalilämpötilan tilanne, joka s. 4/24
 esiteltiin kirjoitelmassa.

$$EI_{DE} := 1 \quad EI_{CD} := 1 \quad EI_{BC} := 1 \quad EI_{AB} := 1$$

$$L_{DE} := 1 \quad L_{CD} := 1 \quad L_{BC} := 1 \quad L_{AB} := 1$$



$$P_1 := 9.5 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 10.622$$

$$P_1 := 11.3 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 16.082$$

$$P_1 := 17.9 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 24.786$$

$$P_1 := 33.0 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 34.543$$

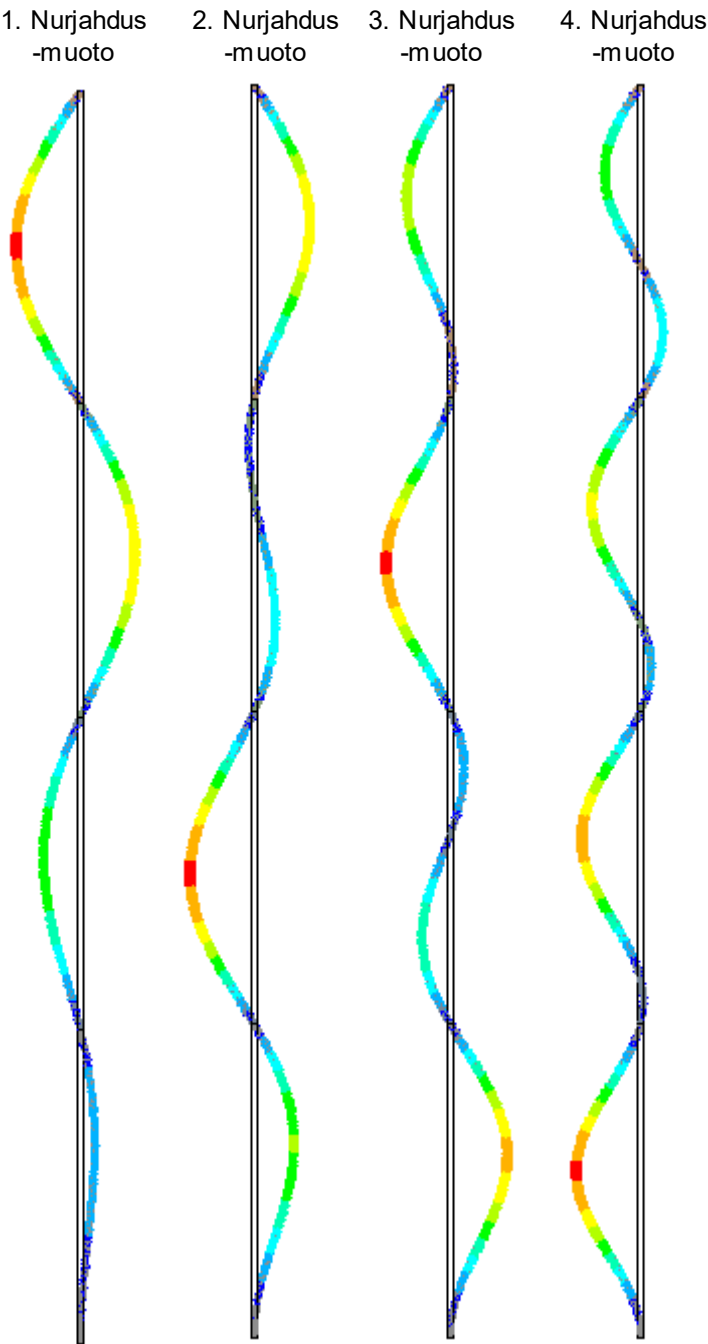
$$P_1 := \begin{pmatrix} 10.622 \\ 16.082 \\ 24.786 \\ 34.543 \end{pmatrix}$$

$$\text{Kerrosväli DE} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{DE}}{P_{10} \cdot L_{DE}^2}} = 0.964$$

$$\text{Kerrosväli CD} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{CD}}{P_{12} \cdot L_{CD}^2}} = 0.631$$

$$\text{Kerrosväli BC} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{BC}}{P_{11} \cdot L_{BC}^2}} = 0.783$$

$$\text{Kerrosväli AB} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{AB}}{P_{13} \cdot L_{AB}^2}} = 0.535$$



| Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Load Multiplier |
|------|---|
| 1, | 912,88 |
| 2, | 1383,9 |
| 3, | 2134,7 |
| 4, | 2975, |
| 5, | 3824,5 |
| 6, | 4685,4 |
| 7, | 5601,1 |
| 8, | 6602,2 |
| 9, | 7998,3 |
| 10, | 9393,8 |

$$P_{cr} := \begin{pmatrix} 912.88 \\ 2134.7 \\ 1383.9 \\ 2975 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

$$L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{P_{cr} \cdot L^2}} = \begin{pmatrix} 0.967 \\ 0.632 \\ 0.785 \\ 0.535 \end{pmatrix}$$

kerrosväli DE

kerrosväli CD

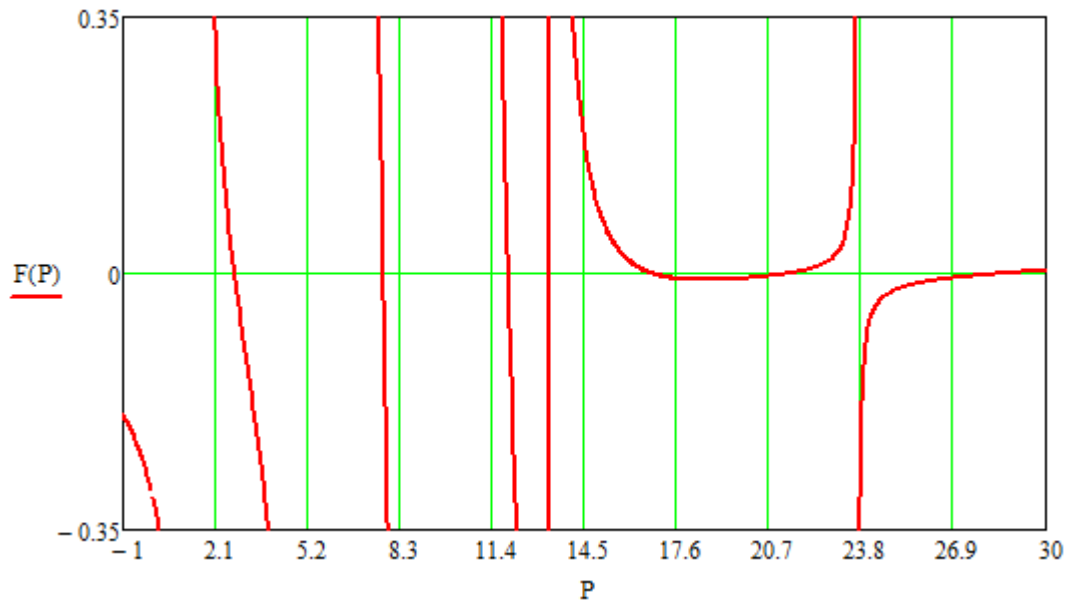
kerrosväli BC

kerrosväli AB

Asettamalla vertailuarvot seuraavasti on kyseessä tilanne, jossa kerrosväli DE on palossa ja sen taivutusjäykkyys on 15 % normaalitilanteen taivutusjäykkyydestä. Tilanne esiteltiin kirjoitelmassa.

s. 6/24

$$\begin{aligned} EI_{DE} &:= 0.15 & EI_{CD} &:= 1 & EI_{BC} &:= 1 & EI_{AB} &:= 1 \\ L_{DE} &:= 1 & L_{CD} &:= 1 & L_{BC} &:= 1 & L_{AB} &:= 1 \end{aligned}$$



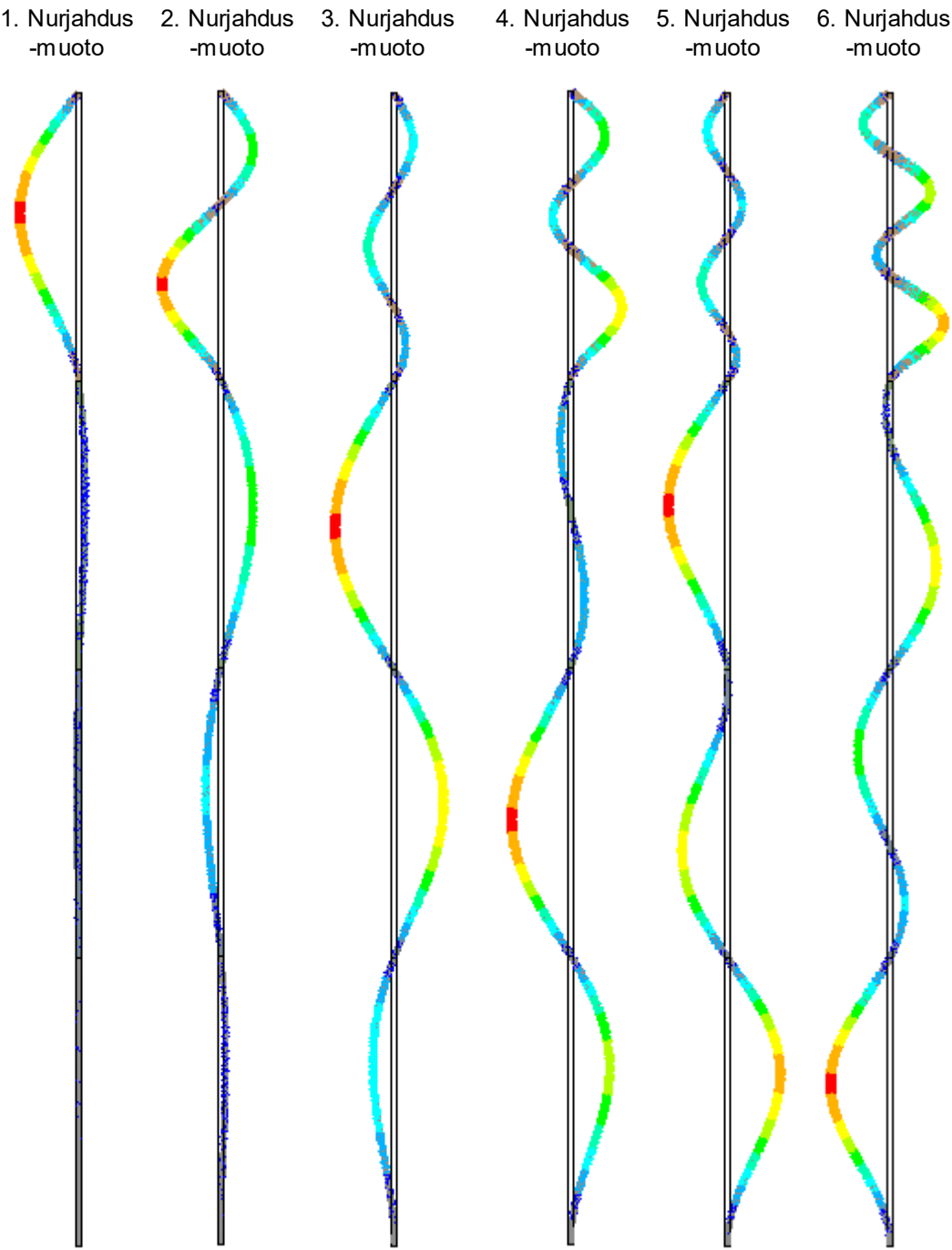
$$\begin{aligned} P_1 &:= 2.7 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 2.759 \\ P_1 &:= 7.8 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 7.757 \\ P_1 &:= 11.9 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 11.946 \\ P_1 &:= 16.7 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 16.739 \\ P_1 &:= 21.4 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 21.373 \\ P_1 &:= 28.6 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 28.64 \end{aligned} \quad P_2 := \begin{pmatrix} 2.759 \\ 7.757 \\ 11.946 \\ 16.739 \\ 21.373 \\ 28.64 \end{pmatrix}$$

$$\text{Kerrosväli DE} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{DE}}{P_{20} \cdot L_{DE}^2}} = 0.733$$

$$\text{Kerrosväli CD} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{CD}}{P_{22} \cdot L_{CD}^2}} = 0.909$$

$$\text{Kerrosväli BC} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{BC}}{P_{23} \cdot L_{BC}^2}} = 0.768$$

$$\text{Kerrosväli AB} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{AB}}{P_{25} \cdot L_{AB}^2}} = 0.587$$



| Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Load Multiplier |
|------|---|
| 1, | 236,65 |
| 2, | 665,86 |
| 3, | 1025,4 |
| 4, | 1434,4 |
| 5, | 1833,8 |
| 6, | 2446, |
| 7, | 2920,3 |
| 8, | 3638,5 |
| 9, | 4099,1 |
| 10, | 4937,9 |

$P_{cr.fi} := 236.65\text{kN}$

$L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_{fi} \cdot I}{P_{cr.fi} \cdot L^2}} = 0.735$

kerrosväli DE

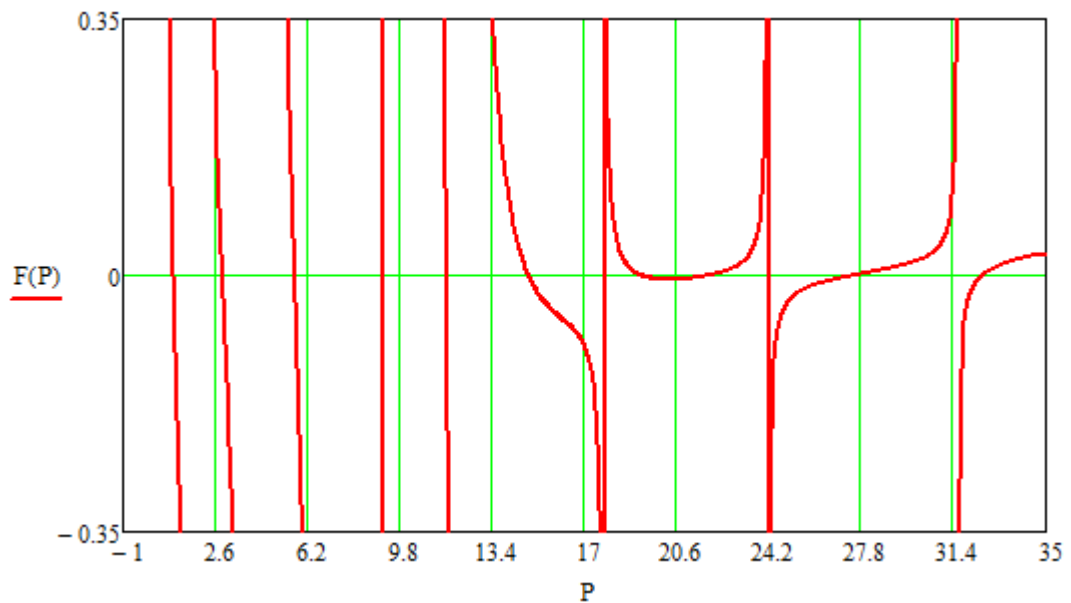
$P_{cr} := \begin{pmatrix} 1025.4 \\ 1434.4 \\ 2446 \end{pmatrix} \text{kN}$

$L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{P_{cr} \cdot L^2}} = \begin{pmatrix} 0.912 \\ 0.771 \\ 0.591 \end{pmatrix}$

kerrosväli CD
kerrosväli BC
kerrosväli AB

$$EI_{DE} := 0.05 \quad EI_{CD} := 1 \quad EI_{BC} := 1 \quad EI_{AB} := 1$$

$$L_{DE} := 1 \quad L_{CD} := 1 \quad L_{BC} := 1 \quad L_{AB} := 1$$



$$P_1 := 1 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 0.98$$

$$P_1 := 2.9 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 2.887$$

$$P_1 := 5.7 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 5.702$$

$$P_1 := 9.1 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 9.18$$

$$P_1 := 11.5 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 11.626$$

$$P_1 := 15.5 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 14.836$$

$$P_1 := 19 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 19.196$$

$$P_1 := 21.5 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 21.853$$

$$P_1 := 27 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 27.497$$

$$P_1 := 33 \quad \text{root}(F(P_1), P_1) = 32.515$$

$$P_3 := \begin{pmatrix} 0.98 \\ 2.887 \\ 5.702 \\ 9.18 \\ 11.626 \\ 14.836 \\ 19.196 \\ 21.853 \\ 27.497 \\ 32.515 \end{pmatrix}$$

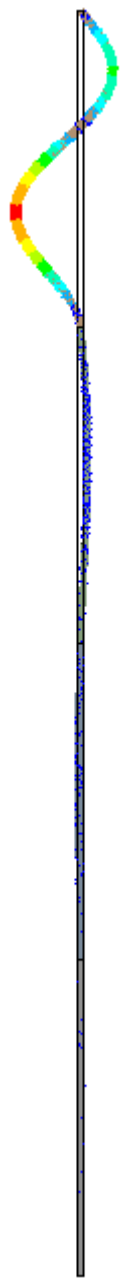
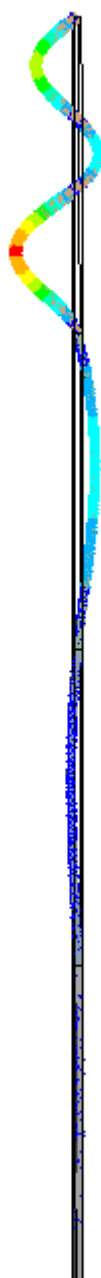
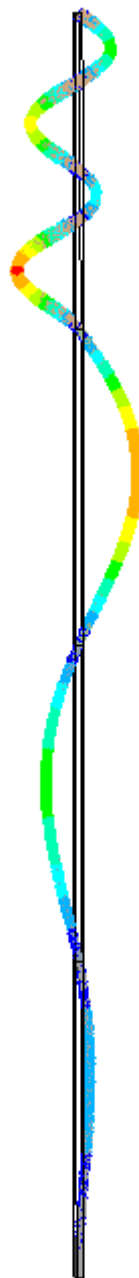
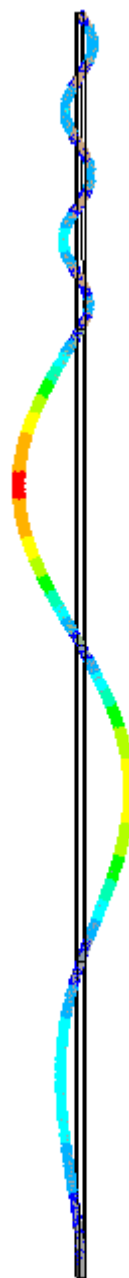
x

$$\text{Kerrosväli DE} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{DE}}{P_{30} \cdot L_{DE}^2}} = 0.71$$

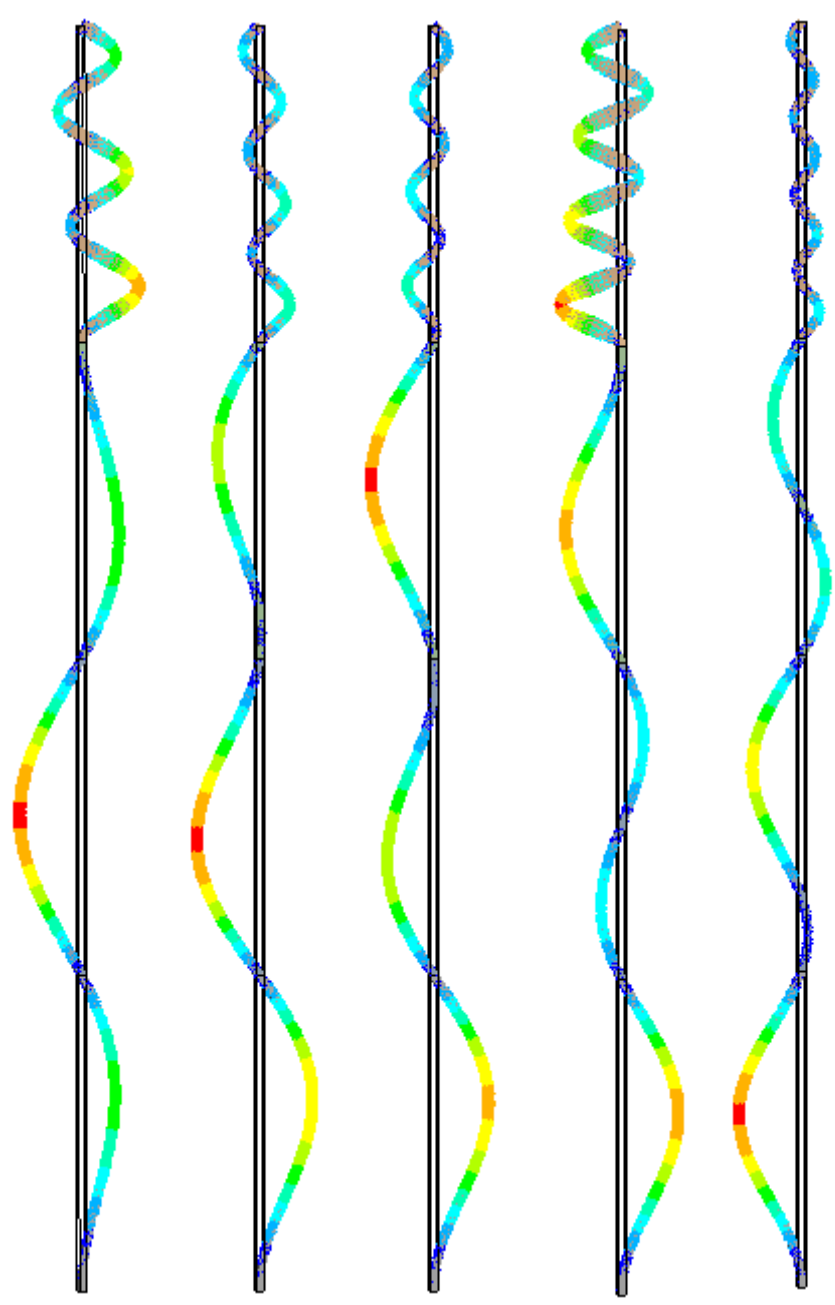
$$\text{Kerrosväli CD} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{CD}}{P_{34} \cdot L_{CD}^2}} = 0.921$$

$$\text{Kerrosväli BC} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{BC}}{P_{35} \cdot L_{BC}^2}} = 0.816$$

$$\text{Kerrosväli AB} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{AB}}{P_{39} \cdot L_{AB}^2}} = 0.551$$

1. Nurjahdus
-muoto2. Nurjahdus
-muoto3. Nurjahdus
-muoto4. Nurjahdus
-muoto5. Nurjahdus
-muoto

6. Nurjahdus -muoto 7. Nurjahdus -muoto 8. Nurjahdus -muoto 9. Nurjahdus -muoto 10. Nurjahdus -muoto

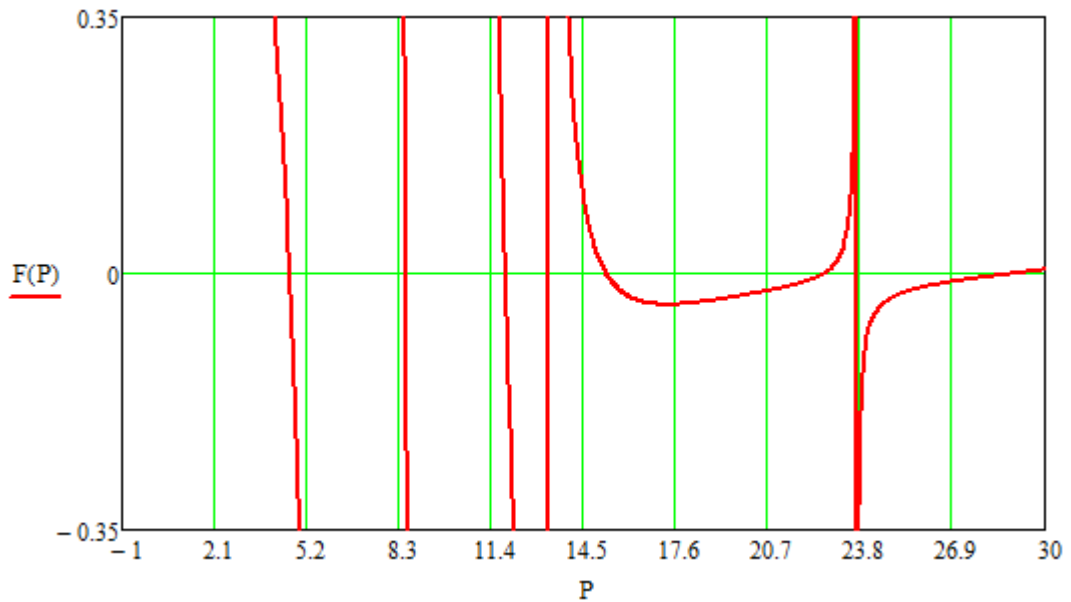


| Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Load Multiplier |
|------|---|
| 1, | 83,418 |
| 2, | 247,25 |
| 3, | 486,93 |
| 4, | 781,55 |
| 5, | 993,49 |
| 6, | 1256,2 |
| 7, | 1627,1 |
| 8, | 1850,7 |
| 9, | 2289,8 |
| 10, | 2748,7 |

$P_{cr.fi} := 83.418 \text{ kN}$ $L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_{fi} \cdot I}{P_{cr.fi} \cdot L^2}} = 0.715$ kerrosväli DE

$P_{cr} := \begin{pmatrix} 993.49 \\ 1256.2 \\ 2748.7 \end{pmatrix} \text{ kN}$ $L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{P_{cr} \cdot L^2}} = \begin{pmatrix} 0.927 \\ 0.824 \\ 0.557 \end{pmatrix}$ kerrosväli CD
kerrosväli BC
kerrosväli AB

$$\begin{aligned} EI_{DE} &:= 1 & EI_{CD} &:= 0.15 & EI_{BC} &:= 1 & EI_{AB} &:= 1 \\ L_{DE} &:= 1 & L_{CD} &:= 1 & L_{BC} &:= 1 & L_{AB} &:= 1 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} P_1 &:= 4.7 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 4.644 \\ P_1 &:= 8.5 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 8.541 \\ P_1 &:= 12 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 11.886 \\ P_1 &:= 15 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 15.279 \\ P_1 &:= 22 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 22.582 \\ P_1 &:= 28.6 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 29.015 \end{aligned} \quad P_4 := \begin{pmatrix} 4.644 \\ 8.541 \\ 11.886 \\ 15.279 \\ 22.582 \\ 29.015 \end{pmatrix}$$

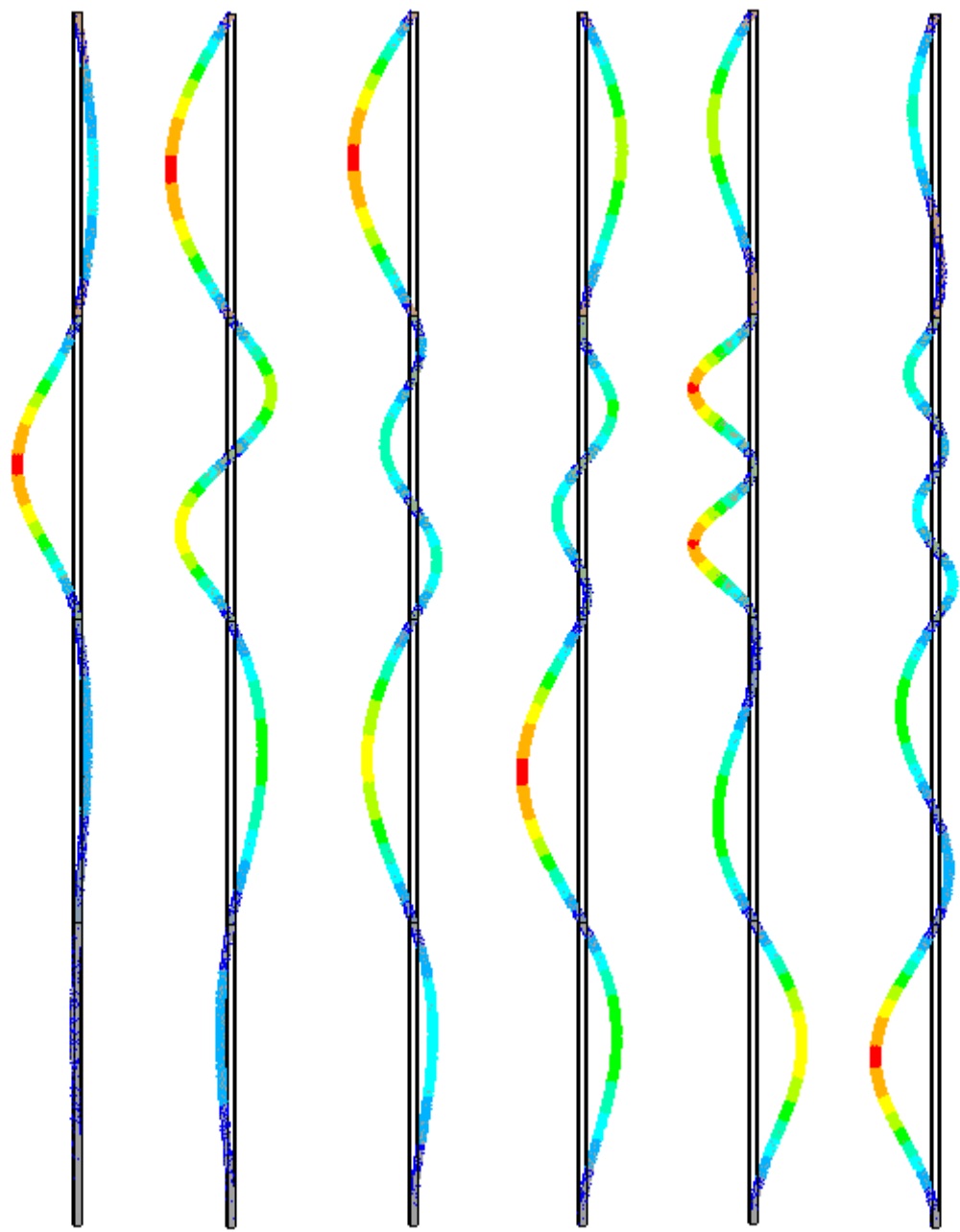
$$\text{Kerrosväli DE} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{DE}}{P_{4_1} \cdot L_{DE}^2}} = 1.075$$

$$\text{Kerrosväli CD} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{CD}}{P_{4_0} \cdot L_{CD}^2}} = 0.565$$

$$\text{Kerrosväli BC} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{BC}}{P_{4_3} \cdot L_{BC}^2}} = 0.804$$

$$\text{Kerrosväli AB} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{AB}}{P_{4_5} \cdot L_{AB}^2}} = 0.583$$

1. Nurjahdus -muoto 2. Nurjahdus -muoto 3. Nurjahdus -muoto 4. Nurjahdus -muoto 5. Nurjahdus -muoto 6. Nurjahdus -muoto

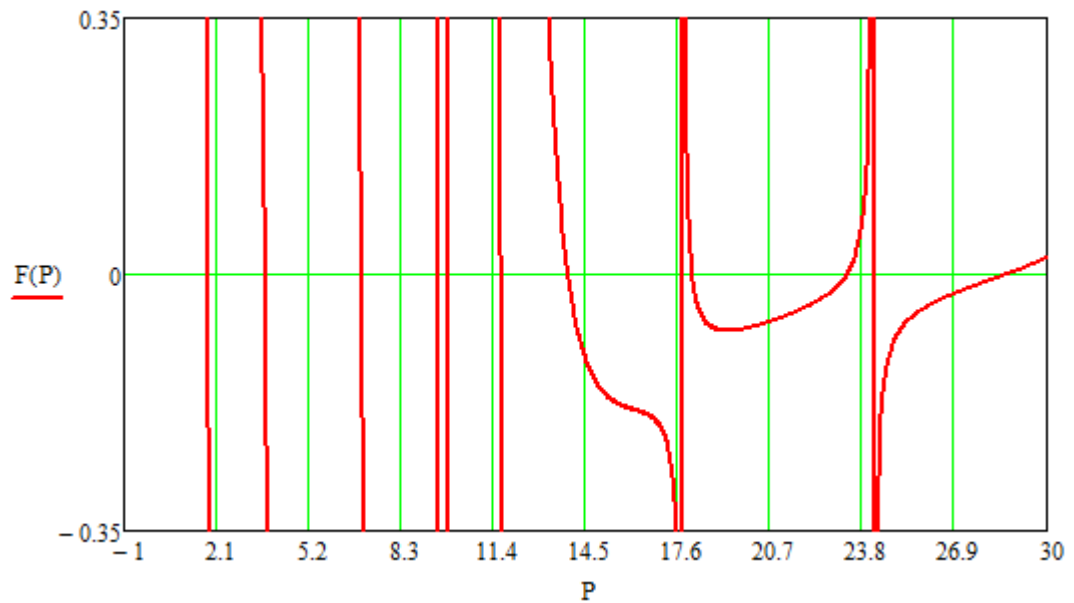


| Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Load Multiplier |
|------|---|
| 1, | 399,89 |
| 2, | 733,46 |
| 3, | 1020,8 |
| 4, | 1313,3 |
| 5, | 1936, |
| 6, | 2484,9 |
| 7, | 2947,9 |
| 8, | 3545,1 |
| 9, | 4155,7 |
| 10, | 4710,4 |

$P_{cr.fi} := 399.89\text{kN}$ $L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_{fi} \cdot I}{P_{cr.fi} \cdot L^2}} = 0.566$ kerrosväli CD

$P_{cr} := \begin{pmatrix} 733.46 \\ 1313.3 \\ 2484.9 \end{pmatrix} \text{kN}$ $L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{P_{cr} \cdot L^2}} = \begin{pmatrix} 1.078 \\ 0.806 \\ 0.586 \end{pmatrix}$ kerrosväli DE
kerrosväli BC
kerrosväli AB

$$\begin{aligned} EI_{DE} &:= 1 & EI_{CD} &:= 0.05 & EI_{BC} &:= 1 & EI_{AB} &:= 1 \\ L_{DE} &:= 1 & L_{CD} &:= 1 & L_{BC} &:= 1 & L_{AB} &:= 1 \end{aligned}$$



| | | |
|---------------|-------------------------------------|---|
| $P_1 := 1.6$ | $\text{root}(F(P_1), P_1) = 1.844$ | $P_5 := \begin{pmatrix} 1.844 \\ 3.741 \\ 6.995 \\ 9.534 \\ 11.653 \\ 13.927 \\ 18.1 \\ 23.295 \\ 28.634 \end{pmatrix}$ |
| $P_1 := 3.5$ | $\text{root}(F(P_1), P_1) = 3.741$ | |
| $P_1 := 6.9$ | $\text{root}(F(P_1), P_1) = 6.995$ | |
| $P_1 := 9.6$ | $\text{root}(F(P_1), P_1) = 9.534$ | |
| $P_1 := 11.5$ | $\text{root}(F(P_1), P_1) = 11.653$ | |
| $P_1 := 13.9$ | $\text{root}(F(P_1), P_1) = 13.927$ | |
| $P_1 := 18.1$ | $\text{root}(F(P_1), P_1) = 18.1$ | |
| $P_1 := 23.5$ | $\text{root}(F(P_1), P_1) = 23.295$ | |
| $P_1 := 28$ | $\text{root}(F(P_1), P_1) = 28.634$ | |

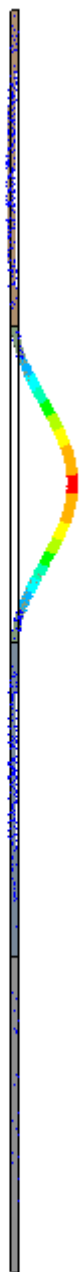
$$\text{Kerrosväli DE} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{DE}}{P_{5_3} \cdot L_{DE}^2}} = 1.017$$

$$\text{Kerrosväli CD} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{CD}}{P_{5_0} \cdot L_{CD}^2}} = 0.517$$

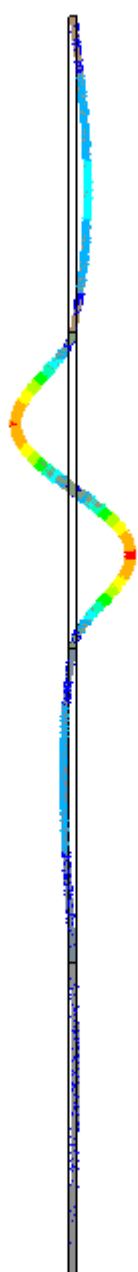
$$\text{Kerrosväli BC} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{BC}}{P_{5_5} \cdot L_{BC}^2}} = 0.842$$

$$\text{Kerrosväli AB} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{AB}}{P_{5_8} \cdot L_{AB}^2}} = 0.587$$

1. Nurjahdus
-muoto



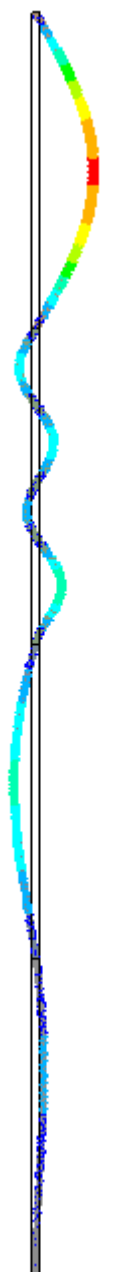
2. Nurjahdus
-muoto



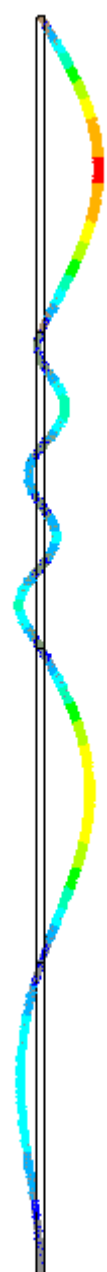
3. Nurjahdus
-muoto



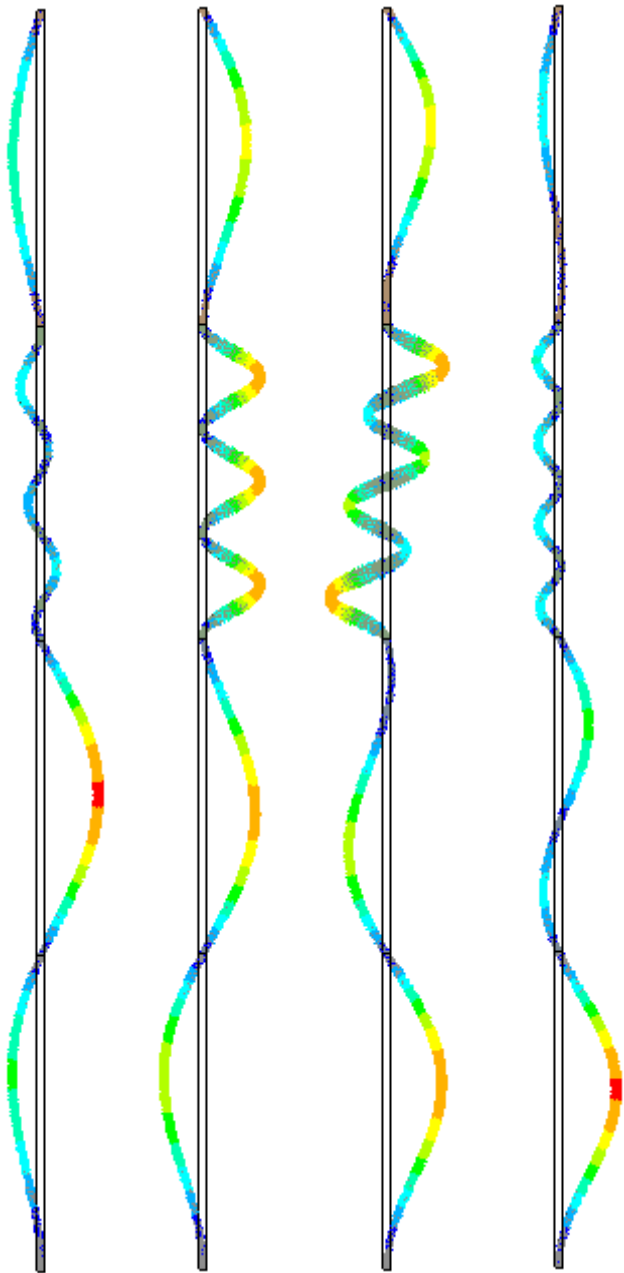
4. Nurjahdus
-muoto



5. Nurjahdus
-muoto



6. Nurjahdus -muoto 7. Nurjahdus -muoto 8. Nurjahdus -muoto 9. Nurjahdus -muoto

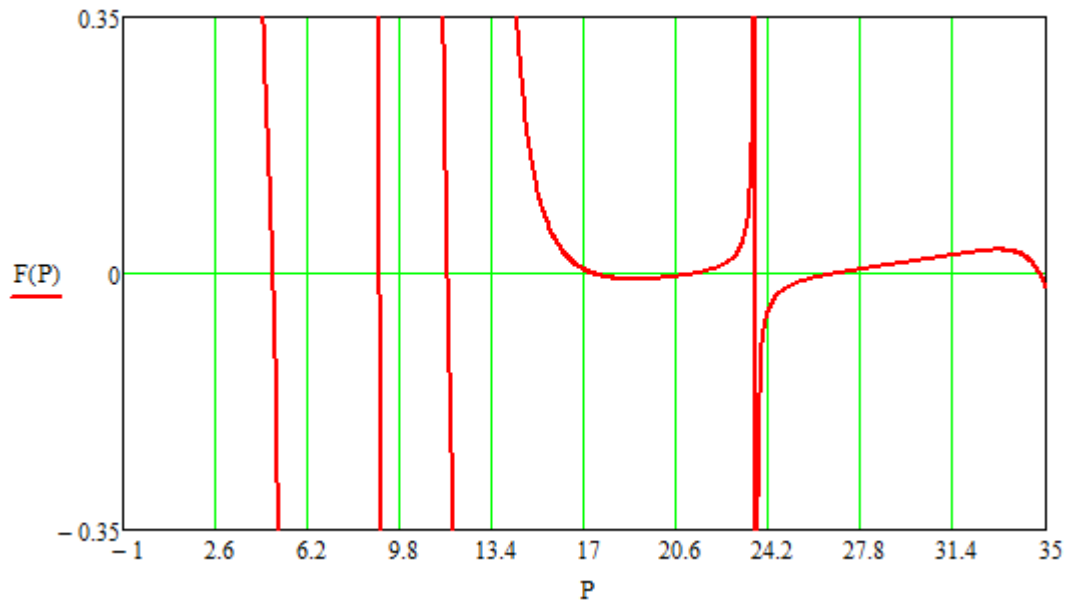


| Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Load Multiplier |
|------|---|
| 1, | 158,26 |
| 2, | 320,81 |
| 3, | 598,22 |
| 4, | 814,48 |
| 5, | 995,3 |
| 6, | 1189,5 |
| 7, | 1531,5 |
| 8, | 1953,3 |
| 9, | 2415,2 |
| 10, | 2693,7 |

$P_{cr.fi} := 158.26 \text{ kN}$ $L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_{fi} \cdot I}{P_{cr.fi} \cdot L^2}} = 0.519$ kerrosväli CD

$P_{cr} := \begin{pmatrix} 814.48 \\ 1189.5 \\ 2415.2 \end{pmatrix} \text{ kN}$ $L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{P_{cr} \cdot L^2}} = \begin{pmatrix} 1.023 \\ 0.847 \\ 0.594 \end{pmatrix}$ kerrosväli DE
kerrosväli BC
kerrosväli AB

$$\begin{aligned} EI_{DE} &:= 1 & EI_{CD} &:= 1 & EI_{BC} &:= 0.15 & EI_{AB} &:= 1 \\ L_{DE} &:= 1 & L_{CD} &:= 1 & L_{BC} &:= 1 & L_{AB} &:= 1 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} P_1 &:= 4.7 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 4.85 \\ P_1 &:= 9 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 8.998 \\ P_1 &:= 11.7 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 11.669 \\ P_1 &:= 18 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 17.311 \\ P_1 &:= 20 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 21.319 \\ P_1 &:= 26 & \text{root}(F(P_1), P_1) &= 26.825 \end{aligned} \quad P_6 := \begin{pmatrix} 4.85 \\ 8.998 \\ 11.669 \\ 17.311 \\ 21.319 \\ 26.825 \end{pmatrix}$$

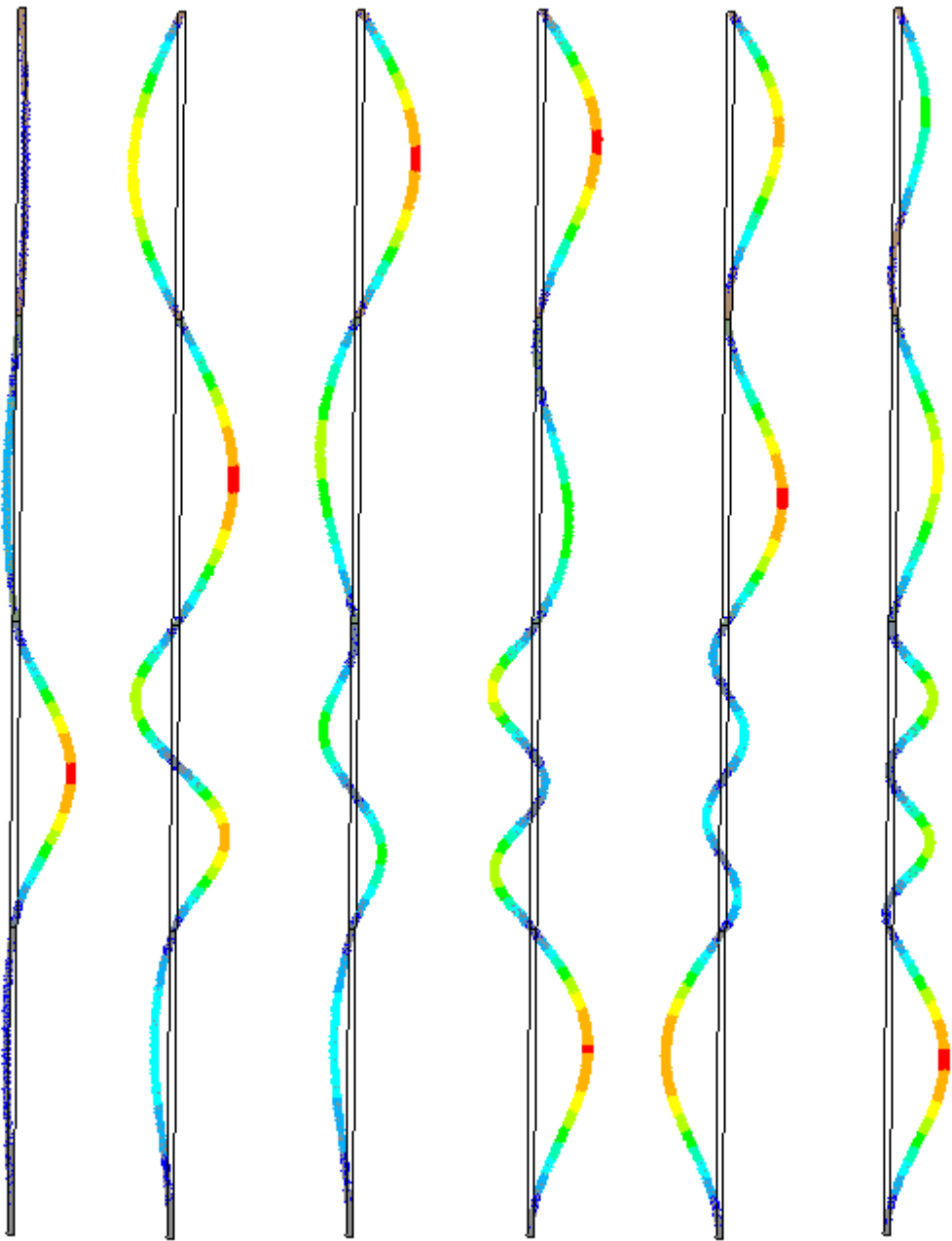
$$\text{Kerrosväli DE} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{DE}}{P_{6_2} \cdot L_{DE}^2}} = 0.92$$

$$\text{Kerrosväli CD} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{CD}}{P_{6_1} \cdot L_{CD}^2}} = 1.047$$

$$\text{Kerrosväli BC} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{BC}}{P_{6_0} \cdot L_{BC}^2}} = 0.552$$

$$\text{Kerrosväli AB} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{AB}}{P_{6_5} \cdot L_{AB}^2}} = 0.607$$

1. Nurjahdus -muoto 2. Nurjahdus -muoto 3. Nurjahdus -muoto 4. Nurjahdus -muoto 5. Nurjahdus -muoto 6. Nurjahdus -muoto

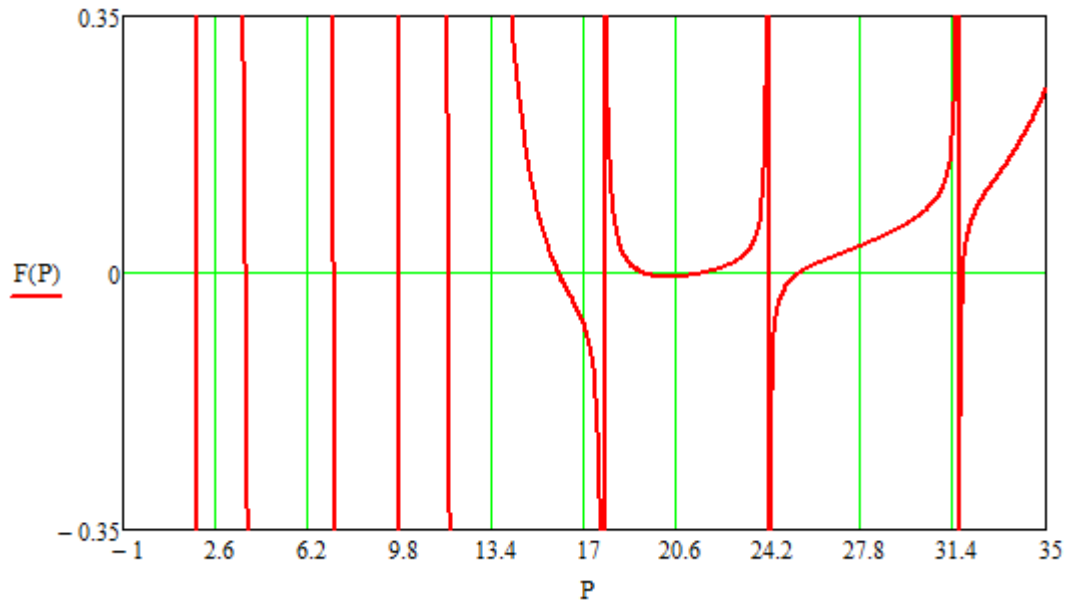


| Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Load Multiplier |
|------|---|
| 1, | 417,82 |
| 2, | 772,86 |
| 3, | 1002,9 |
| 4, | 1484,6 |
| 5, | 1830,4 |
| 6, | 2301,1 |
| 7, | 2968,6 |
| 8, | 3502,6 |
| 9, | 4301,8 |
| 10, | 4967,8 |

$P_{cr.fi} := 417.82\text{kN}$ $L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_{fi} \cdot I}{P_{cr.fi} \cdot L^2}} = 0.553$ kerrosväli BC

$P_{cr} := \begin{pmatrix} 1002.9 \\ 772.86 \\ 2301.1 \end{pmatrix} \text{kN}$ $L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{P_{cr} \cdot L^2}} = \begin{pmatrix} 0.922 \\ 1.051 \\ 0.609 \end{pmatrix}$ kerrosväli DE
kerrosväli CD
kerrosväli AB

$$\begin{array}{llll} EI_{DE} := 1 & EI_{CD} := 1 & EI_{BC} := 0.05 & EI_{AB} := 1 \\ L_{DE} := 1 & L_{CD} := 1 & L_{BC} := 1 & L_{AB} := 1 \end{array}$$



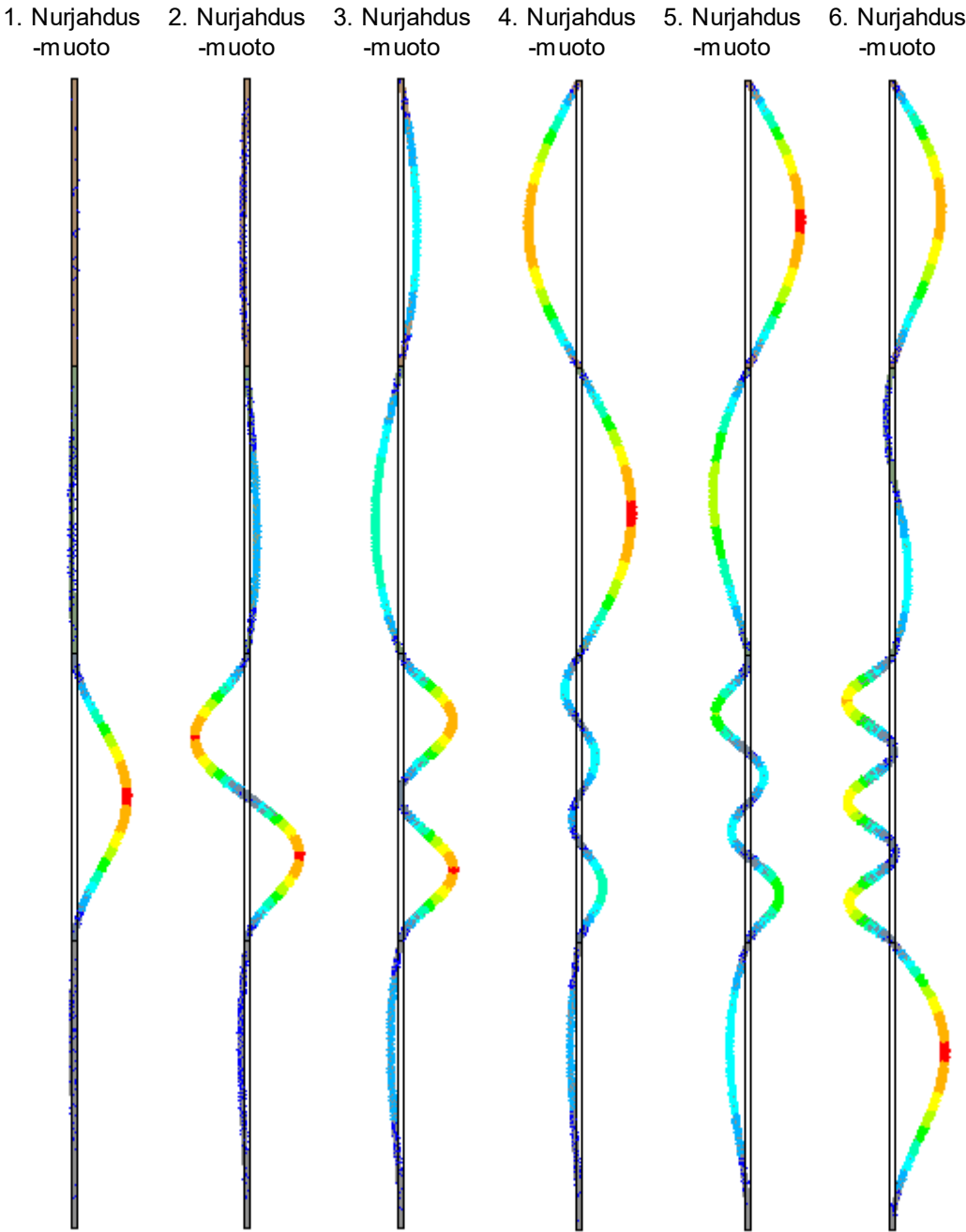
$$\begin{array}{ll} P_1 := 1.5 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 1.862 \\ P_1 := 3.5 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 3.792 \\ P_1 := 7.2 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 7.21 \\ P_1 := 9.7 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 9.737 \\ P_1 := 11.7 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 11.701 \\ P_1 := 16 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 16.007 \end{array} \quad P_7 := \begin{pmatrix} 1.862 \\ 3.792 \\ 7.21 \\ 9.737 \\ 11.701 \\ 16.007 \end{pmatrix}$$

$$\text{Kerrosväli DE} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{DE}}{P_{7_4} \cdot L_{DE}^2}} = 0.918$$

$$\text{Kerrosväli CD} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{CD}}{P_{7_3} \cdot L_{CD}^2}} = 1.007$$

$$\text{Kerrosväli BC} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{BC}}{P_{7_0} \cdot L_{BC}^2}} = 0.515$$

$$\text{Kerrosväli AB} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{AB}}{P_{7_5} \cdot L_{AB}^2}} = 0.785$$



| Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Load Multiplier |
|------|---|
| 1, | 159,88 |
| 2, | 325,18 |
| 3, | 616,6 |
| 4, | 833,04 |
| 5, | 997,46 |
| 6, | 1356,5 |
| 7, | 1638,2 |
| 8, | 1840,5 |
| 9, | 2139, |
| 10, | 2644, |

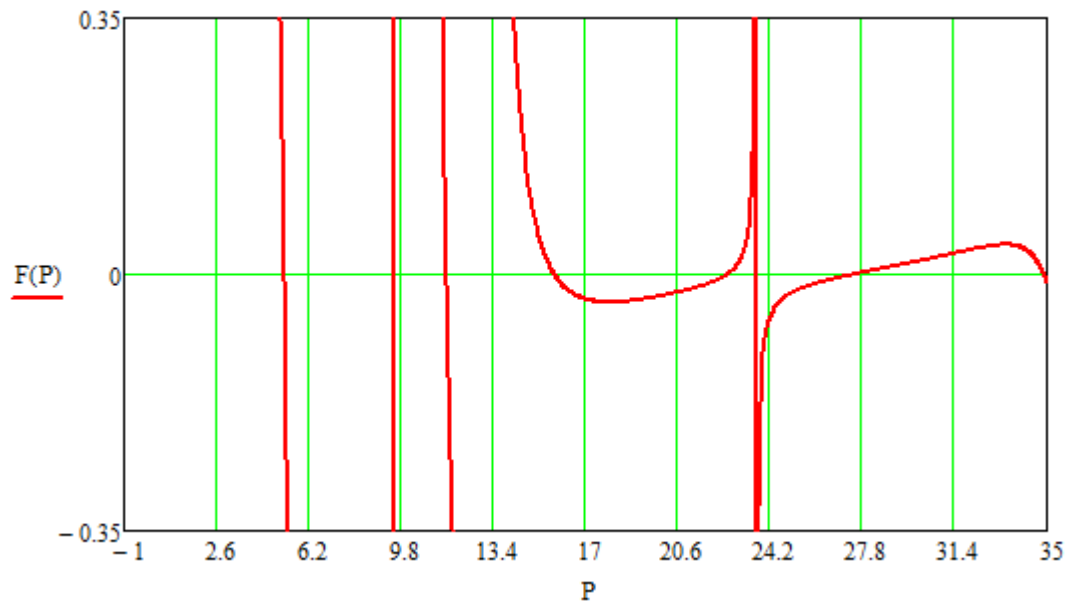
$P_{cr.fi} := 159.88\text{kN}$ $L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_{fi} \cdot I}{P_{cr.fi} \cdot L^2}} = 0.516$

kerrosväli BC

$P_{cr} := \begin{pmatrix} 997.46 \\ 833.04 \\ 1356.5 \end{pmatrix} \text{kN}$ $L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{P_{cr} \cdot L^2}} = \begin{pmatrix} 0.925 \\ 1.012 \\ 0.793 \end{pmatrix}$

kerrosväli DE
kerrosväli CD
kerrosväli AB

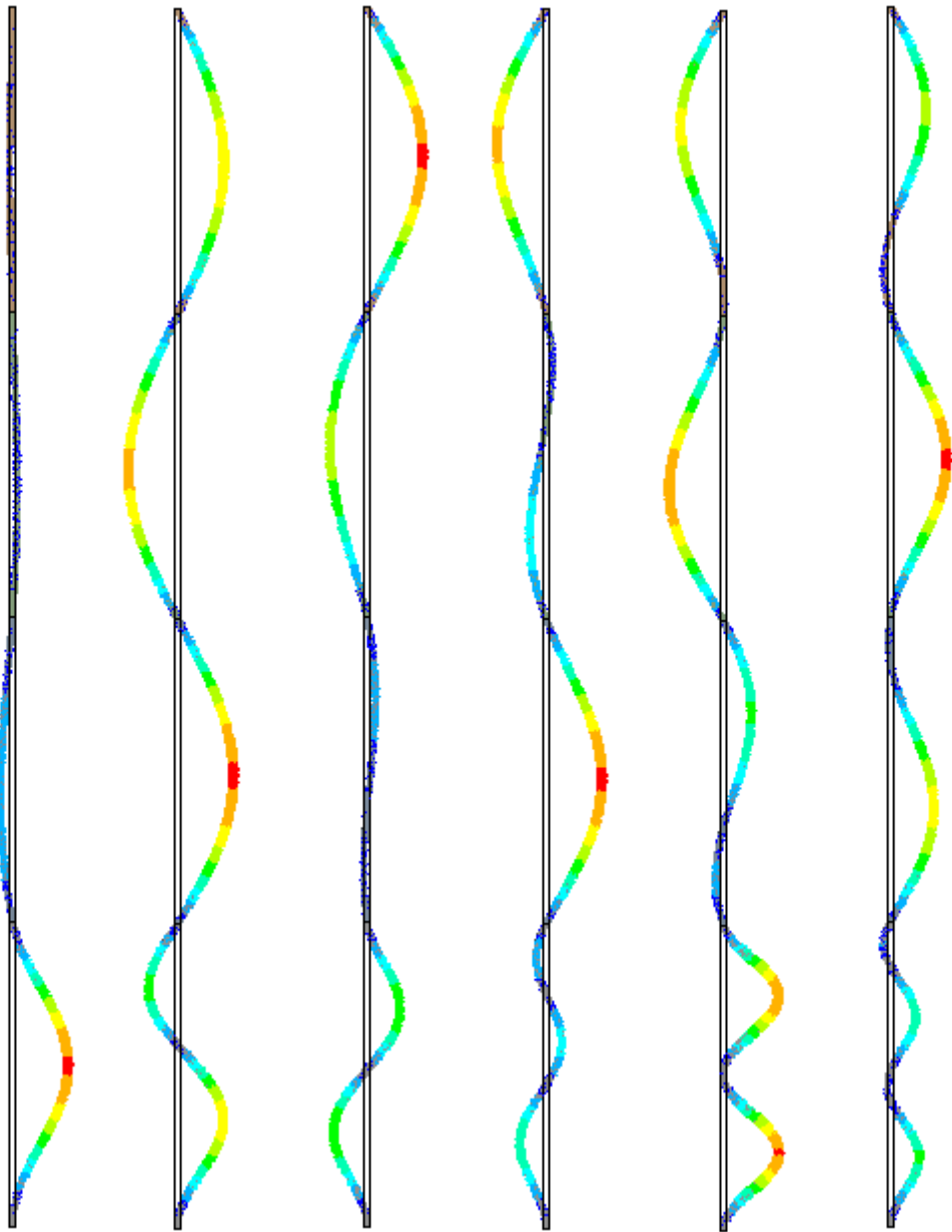
$$\begin{array}{llll} EI_{DE} := 1 & EI_{CD} := 1 & EI_{BC} := 1 & EI_{AB} := 0.15 \\ L_{DE} := 1 & L_{CD} := 1 & L_{BC} := 1 & L_{AB} := 1 \end{array}$$



$$\begin{array}{ll} P_1 := 5.4 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 5.261 \\ P_1 := 9.6 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 9.541 \\ P_1 := 11 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 11.593 \\ P_1 := 16.1 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 15.804 \\ P_1 := 22.8 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 22.529 \\ P_1 := 27.6 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 27.503 \end{array} \quad P_8 := \begin{pmatrix} 5.261 \\ 9.541 \\ 11.593 \\ 15.804 \\ 22.529 \\ 27.503 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Kerrosväli DE} & \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{DE}}{P_{8_2} \cdot L_{DE}^2}} = 0.923 \\ \text{Kerrosväli CD} & \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{CD}}{P_{8_5} \cdot L_{CD}^2}} = 0.599 \\ \text{Kerrosväli BC} & \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{BC}}{P_{8_1} \cdot L_{BC}^2}} = 1.017 \\ \text{Kerrosväli AB} & \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{AB}}{P_{8_0} \cdot L_{AB}^2}} = 0.53 \end{array}$$

1. Nurjahdus -muoto 2. Nurjahdus -muoto 3. Nurjahdus -muoto 4. Nurjahdus -muoto 5. Nurjahdus -muoto 6. Nurjahdus -muoto

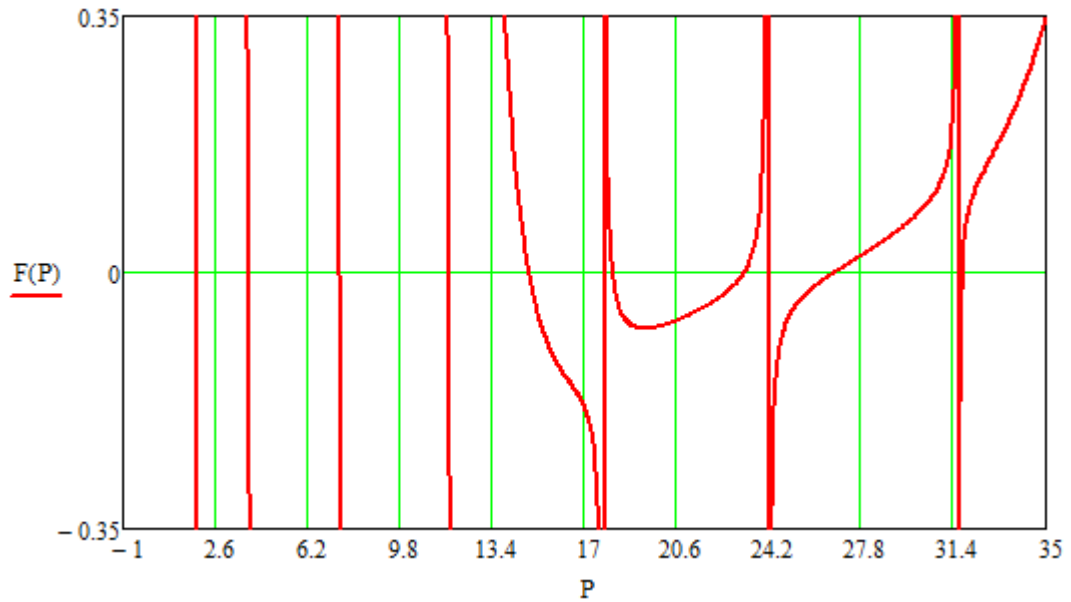


| Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Load Multiplier |
|------|---|
| 1, | 453,67 |
| 2, | 819,9 |
| 3, | 996,94 |
| 4, | 1358,7 |
| 5, | 1932,9 |
| 6, | 2361,8 |
| 7, | 2979, |
| 8, | 3479,6 |
| 9, | 4295,1 |
| 10, | 4745,6 |

$P_{cr.fi} := 453.67\text{kN}$ $L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_{fi} \cdot I}{P_{cr.fi} \cdot L^2}} = 0.531$ kerrosväli AB

$P_{cr} := \begin{pmatrix} 996.94 \\ 2361.8 \\ 819.9 \end{pmatrix} \text{kN}$ $L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{P_{cr} \cdot L^2}} = \begin{pmatrix} 0.925 \\ 0.601 \\ 1.02 \end{pmatrix}$ kerrosväli DE
kerrosväli CD
kerrosväli BC

$$\begin{array}{llll} EI_{DE} := 1 & EI_{CD} := 1 & EI_{BC} := 1 & EI_{AB} := 0.05 \\ L_{DE} := 1 & L_{CD} := 1 & L_{BC} := 1 & L_{AB} := 1 \end{array}$$



$$\begin{array}{ll} P_1 := 1.9 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 1.912 \\ P_1 := 3.8 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 3.898 \\ P_1 := 7.2 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 7.46 \\ P_1 := 12 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 11.711 \\ P_1 := 15 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 14.858 \\ P_1 := 18 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 18.121 \\ P_1 := 23 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 23.233 \\ P_1 := 26 & \text{root}(F(P_1), P_1) = 26.753 \end{array} \quad P_9 := \begin{pmatrix} 1.912 \\ 3.898 \\ 7.46 \\ 11.711 \\ 14.858 \\ 18.121 \\ 23.233 \\ 26.753 \end{pmatrix}$$

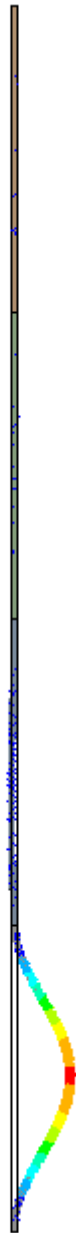
$$\text{Kerrosväli DE} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{DE}}{P_{9_4} \cdot L_{DE}}} = 0.815$$

$$\text{Kerrosväli CD} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{CD}}{P_{9_7} \cdot L_{CD}}} = 0.607$$

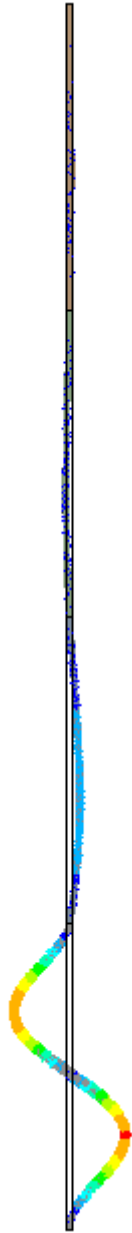
$$\text{Kerrosväli BC} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{BC}}{P_{9_3} \cdot L_{BC}}} = 0.918$$

$$\text{Kerrosväli AB} \quad \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot EI_{AB}}{P_{9_0} \cdot L_{AB}}} = 0.508$$

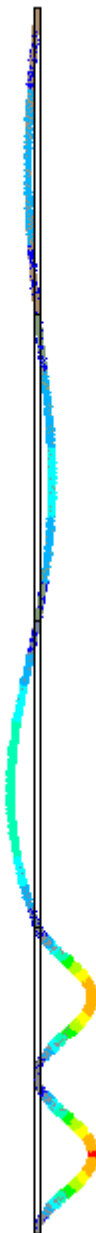
1. Nurjahdus
-muoto



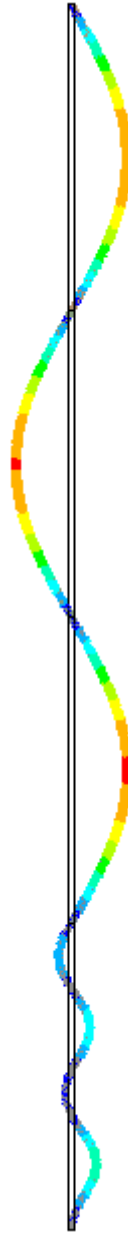
2. Nurjahdus
-muoto



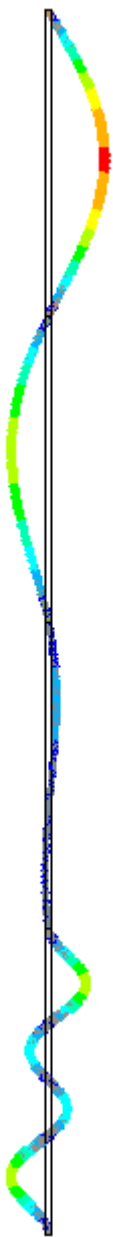
3. Nurjahdus
-muoto



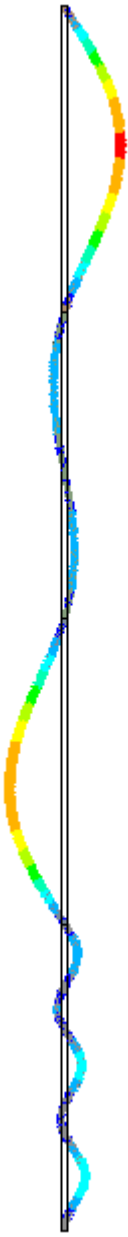
4. Nurjahdus
-muoto



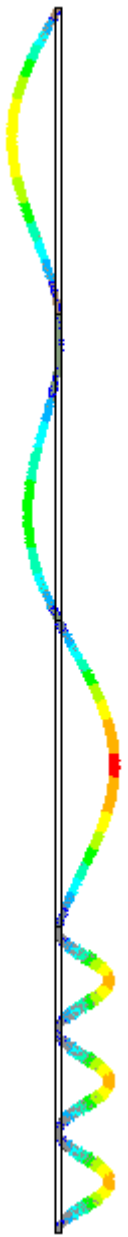
5. Nurjahdus
-muoto



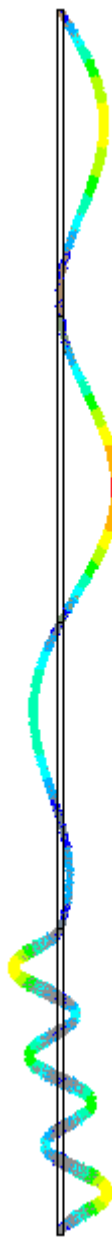
6. Nurjahdus
-muoto



7. Nurjahdus
-muoto



8. Nurjahdus
-muoto



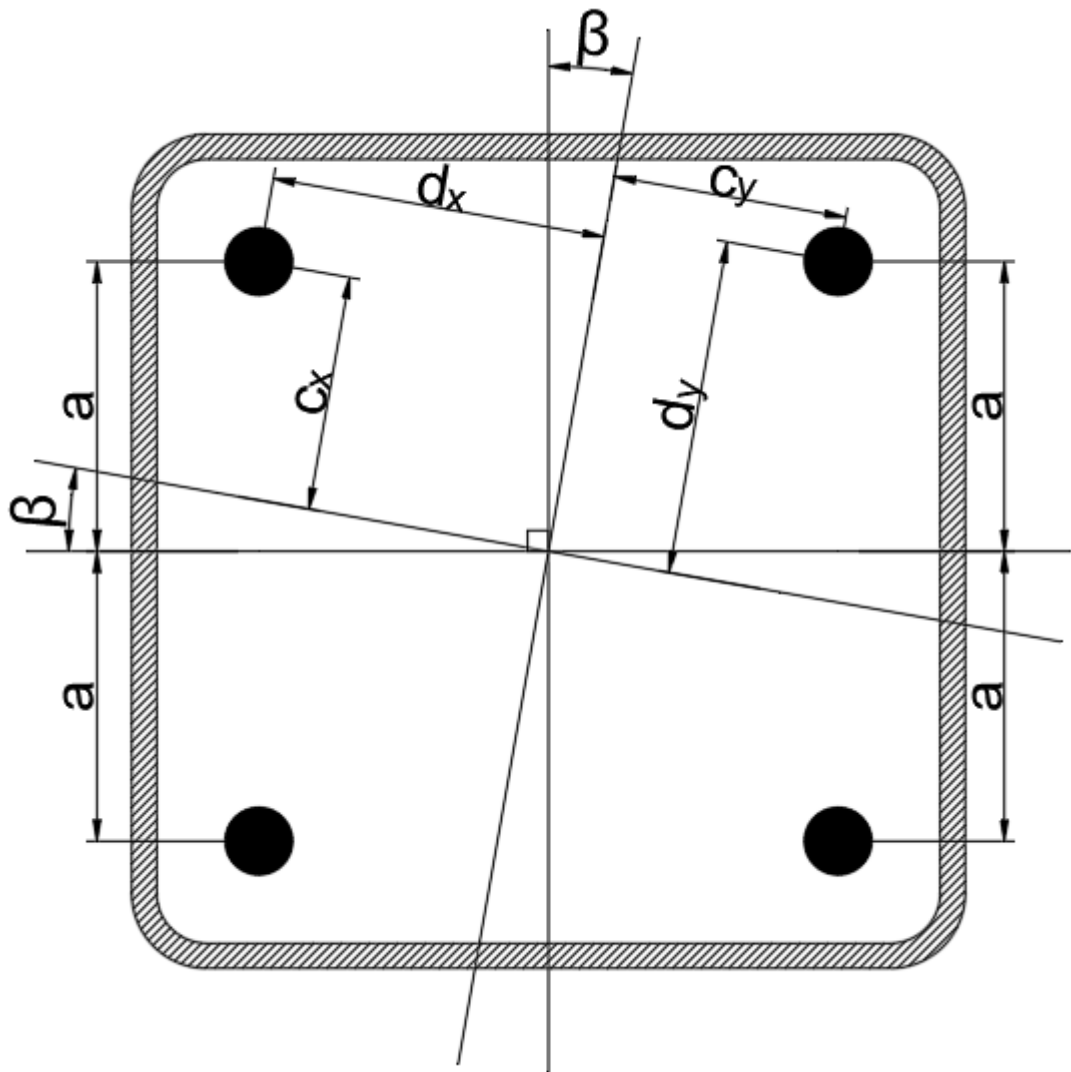
| Mode | <input checked="" type="checkbox"/> Load Multiplier |
|------|---|
| 1, | 164,35 |
| 2, | 334,69 |
| 3, | 638,51 |
| 4, | 846,38 |
| 5, | 998,65 |
| 6, | 1270,4 |
| 7, | 1535,5 |
| 8, | 1952,3 |
| 9, | 2279,7 |
| 10, | 2643, |

$$P_{cr.fi} := 164.35 \text{ kN}$$
$$L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_{fi} \cdot I}{P_{cr.fi} \cdot L^2}} = 0.509$$

kerrosväli AB

$$P_{cr} := \begin{pmatrix} 998.65 \\ 1952.3 \\ 846.38 \end{pmatrix} \text{ kN}$$
$$L_n := \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{P_{cr} \cdot L^2}} = \begin{pmatrix} 0.924 \\ 0.661 \\ 1.004 \end{pmatrix}$$

kerrosväli DE
kerrosväli CD
kerrosväli BC



$$c_x(\beta) := \sqrt{2} \cdot a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)$$

$$d_x(\beta) := \sqrt{2} \cdot a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta + 2 \cdot \beta\right)$$

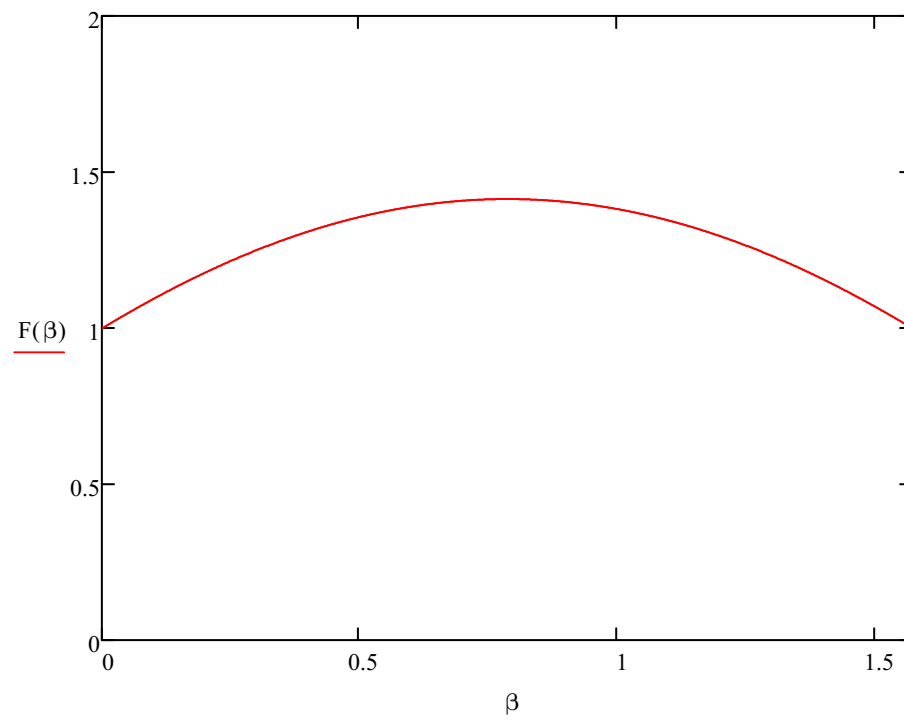
$$F_x(\beta) := \frac{c_x(\beta) + d_x(\beta)}{2a} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right) + \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta\right) \right)$$

$$c_y(\beta) := \sqrt{2} \cdot a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)$$

$$d_y(\beta) := \sqrt{2} \cdot a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta + 2 \cdot \beta\right)$$

$$F_y(\beta) := \frac{\left(c_y\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) + d_y\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \right)}{2a} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left(\sin\left(\beta - \frac{\pi}{4}\right) + \sin\left(\frac{3 \cdot \pi}{4} - \beta\right) \right)$$

$$F(\beta) := F_x(\beta) + F_y(\beta)$$



$$F(0) = 1$$

$$F(5\text{deg}) = 1.083$$

$$F(10\text{deg}) = 1.158$$

$$F(15\text{deg}) = 1.225$$

$$F(20\text{deg}) = 1.282$$

$$F(22.5\text{deg}) = 1.307$$

$$F(25\text{deg}) = 1.329$$

$$F(30\text{deg}) = 1.366$$

$$F(35\text{deg}) = 1.393$$

$$F(40\text{deg}) = 1.409$$

$$F(45\text{deg}) = 1.414$$

$$F(50\text{deg}) = 1.409$$

$$F(55\text{deg}) = 1.393$$

$$F(60\text{deg}) = 1.366$$

$$F(65\text{deg}) = 1.329$$

$$F(67.5\text{deg}) = 1.307$$

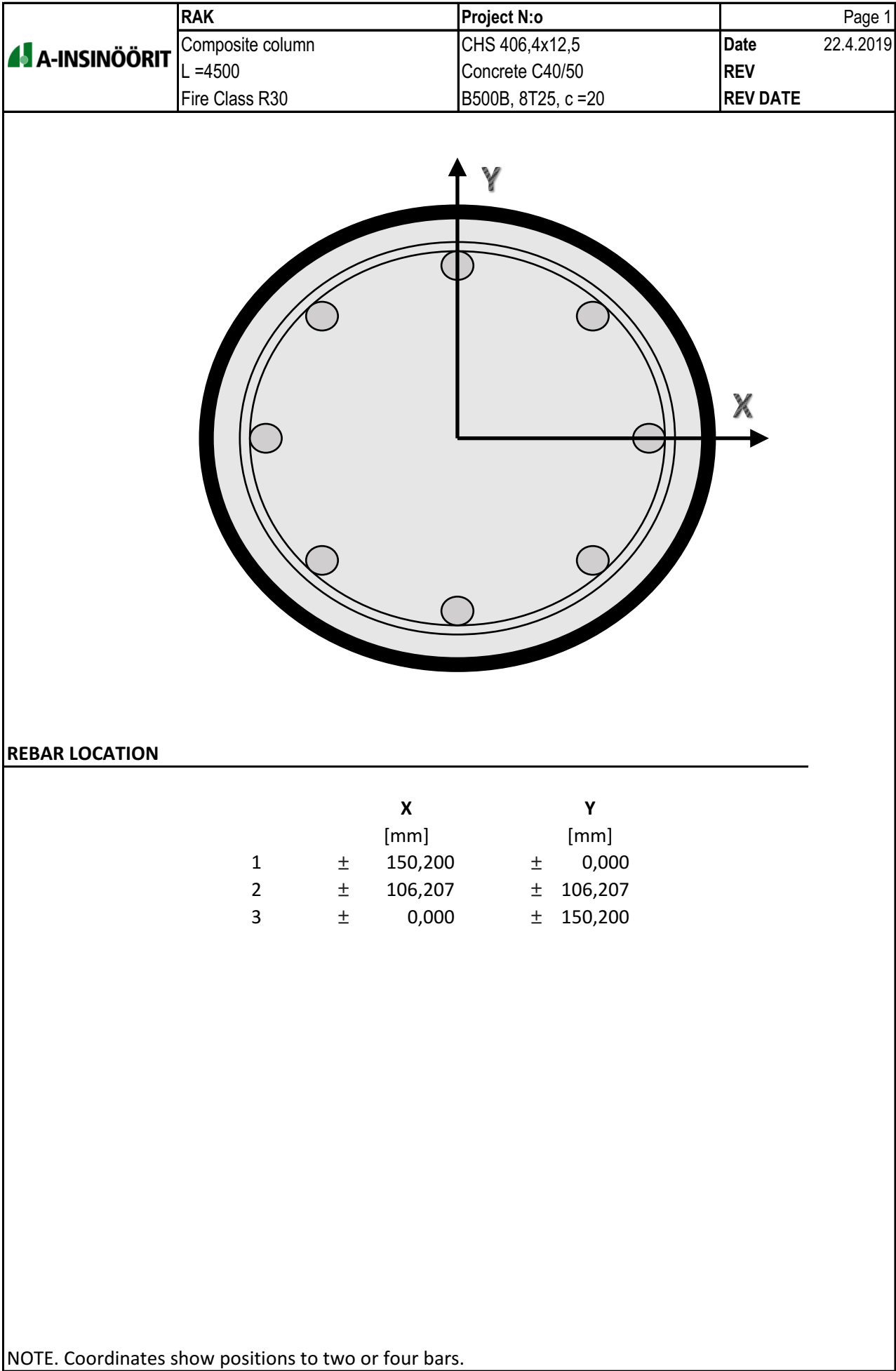
$$F(70\text{deg}) = 1.282$$


$$F(75\text{deg}) = 1.225$$

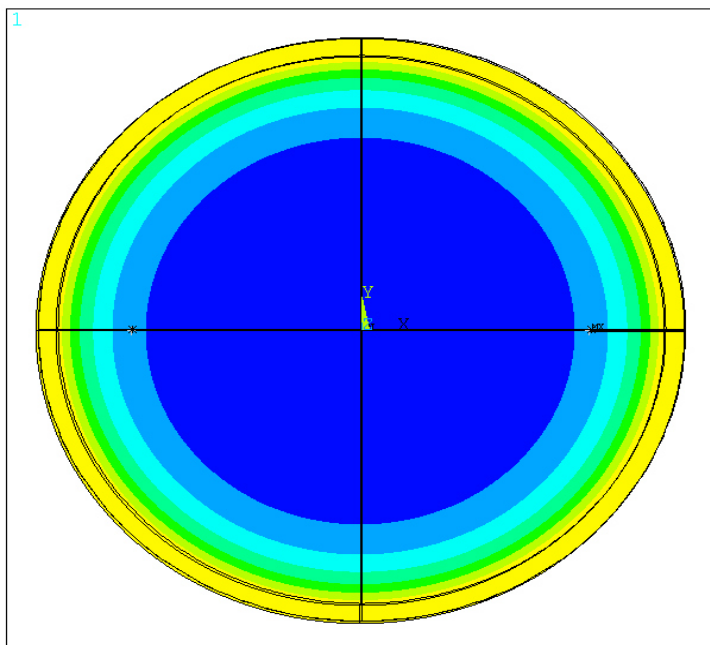
$$F(80\text{deg}) = 1.158$$

$$F(85\text{deg}) = 1.083$$

$$F(90\text{deg}) = 1$$

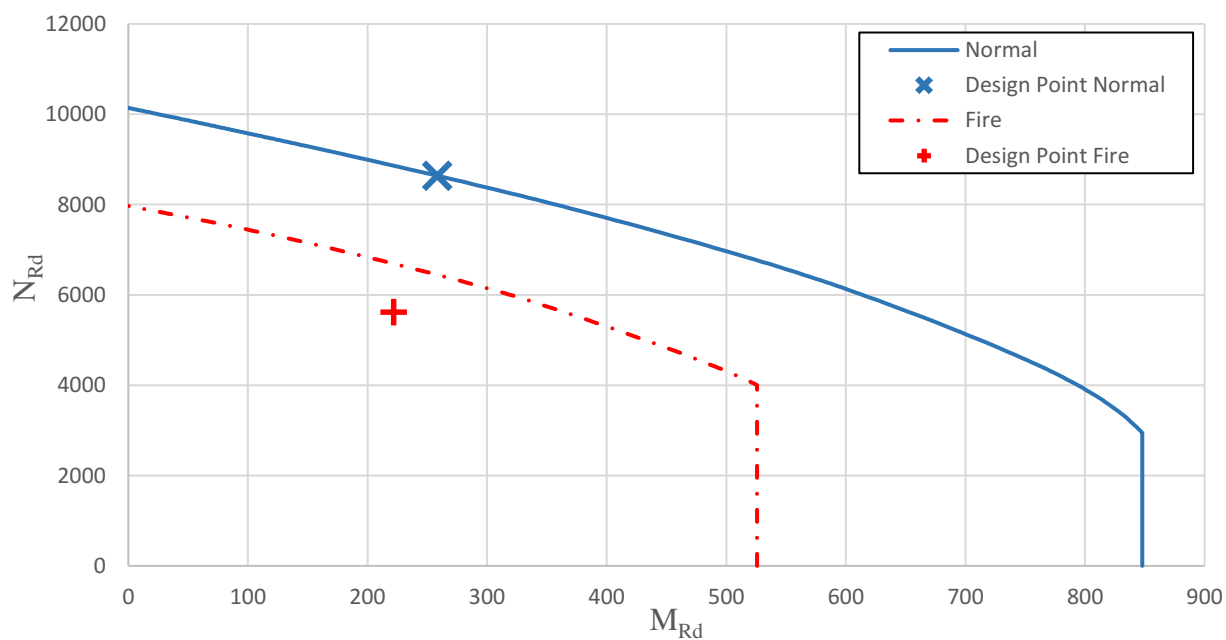



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 2 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R30 | B500B, 8T25, c =20 | REV DATE |

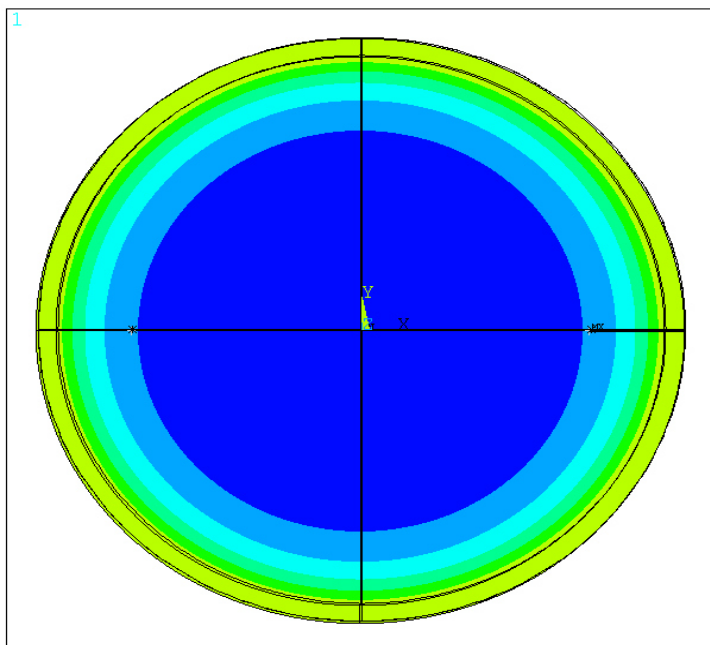
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =360
 TIME=1800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =20.653
 SMK =841.796
 20.653
 111.891
 203.129
 294.367
 385.605
 476.843
 568.082
 659.32
 750.558
 841.796

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 8617 | 5601 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 8639 | 5620 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 258,3 | 221,9 | kNm |

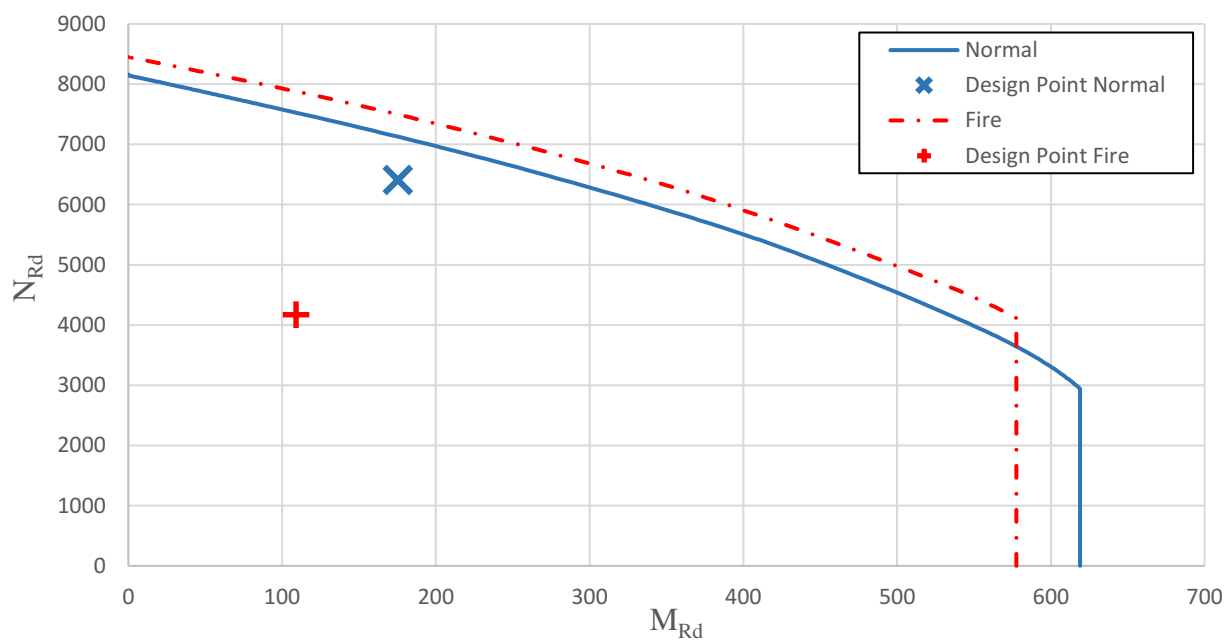



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 3 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R30 | B500B, 8T25, c =20 | REV REV DATE |

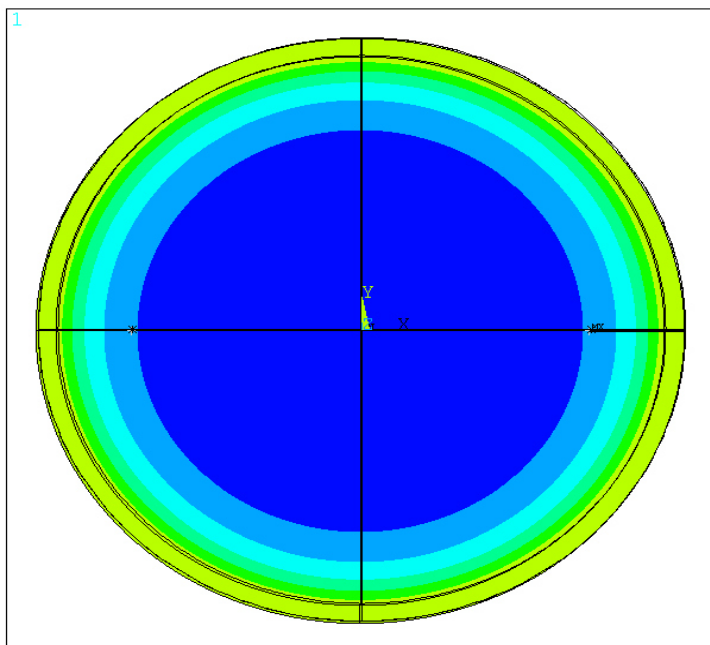
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =360
 TIME=1800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =20.5304
 SMX =841.796
 20.5304
 111.782
 203.034
 294.286
 385.537
 476.789
 568.041
 659.292
 750.544
 841.796

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 6388 | 4152 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 6410 | 4171 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 175,2 | 109,1 | kNm |

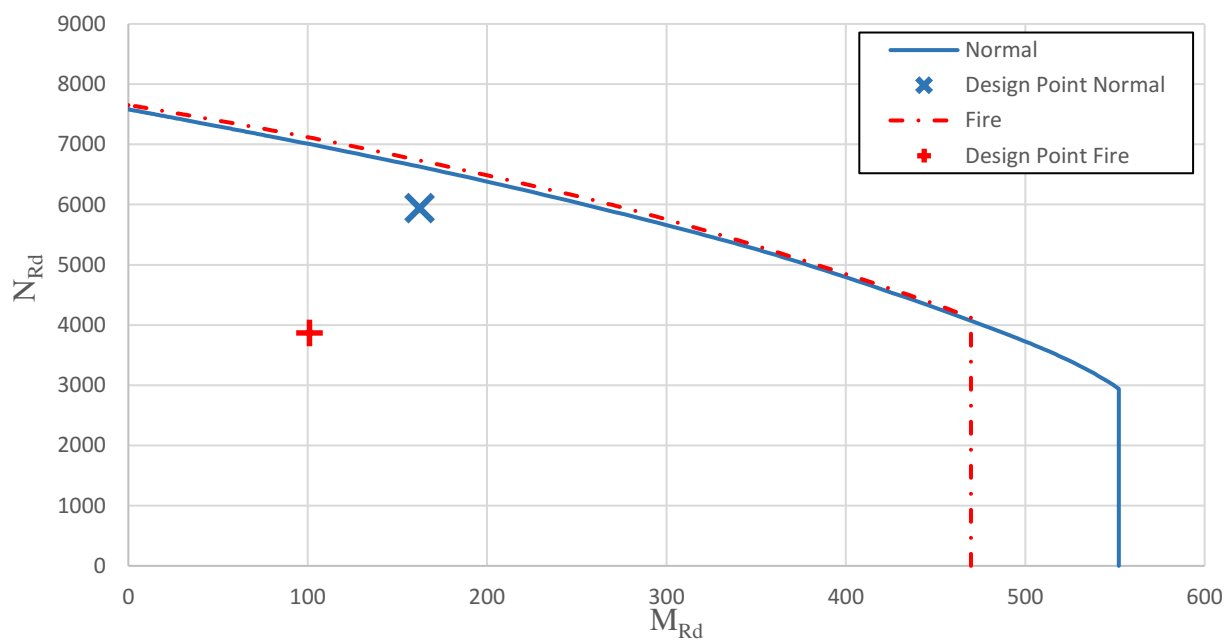



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 4 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R30 | B500B, 8T25, c =20 | REV REV DATE |

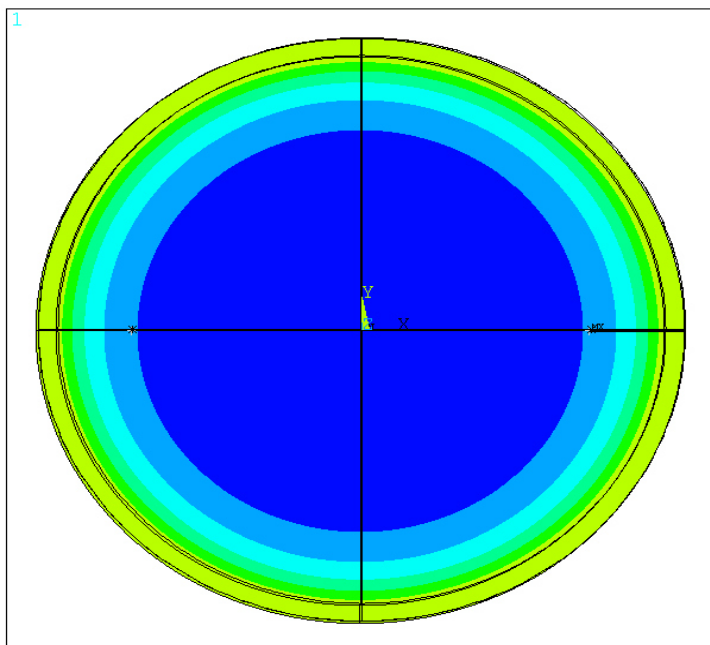
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =360
 TIME=1800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =20.5113
 SMX =841.796
 20.5113
 111.765
 203.019
 294.273
 385.527
 476.781
 568.034
 659.288
 750.542
 841.796

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 5919 | 3847 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 5941 | 3866 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 162,4 | 101,0 | kNm |

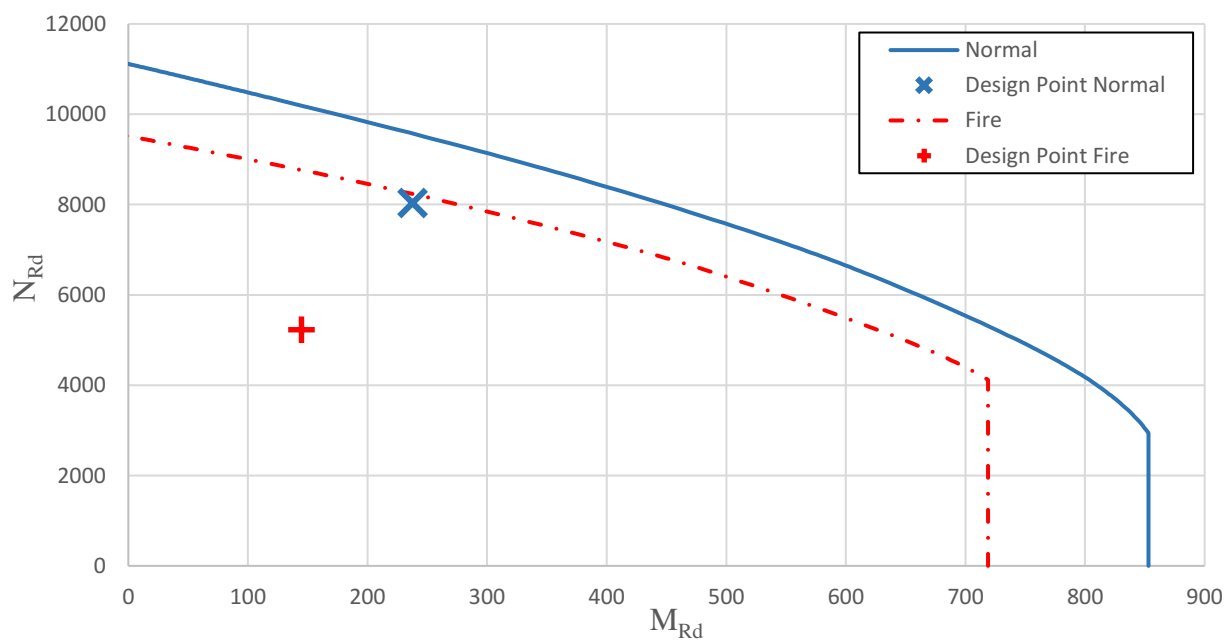



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 5 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R30 | B500B, 8T25, c =20 | REV REV DATE |

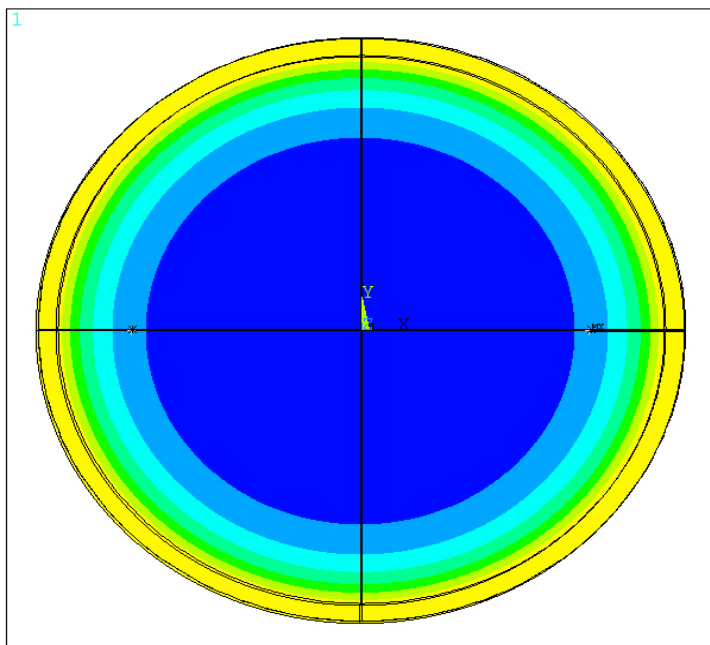
Steel**1.4462**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =360
 TIME=1800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =20.5113
 SMK =841.796
 20.5113
 111.765
 203.019
 294.273
 385.527
 476.781
 568.034
 659.288
 750.542
 841.796

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 8015 | 5210 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 8037 | 5229 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 237,7 | 144,9 | kNm |

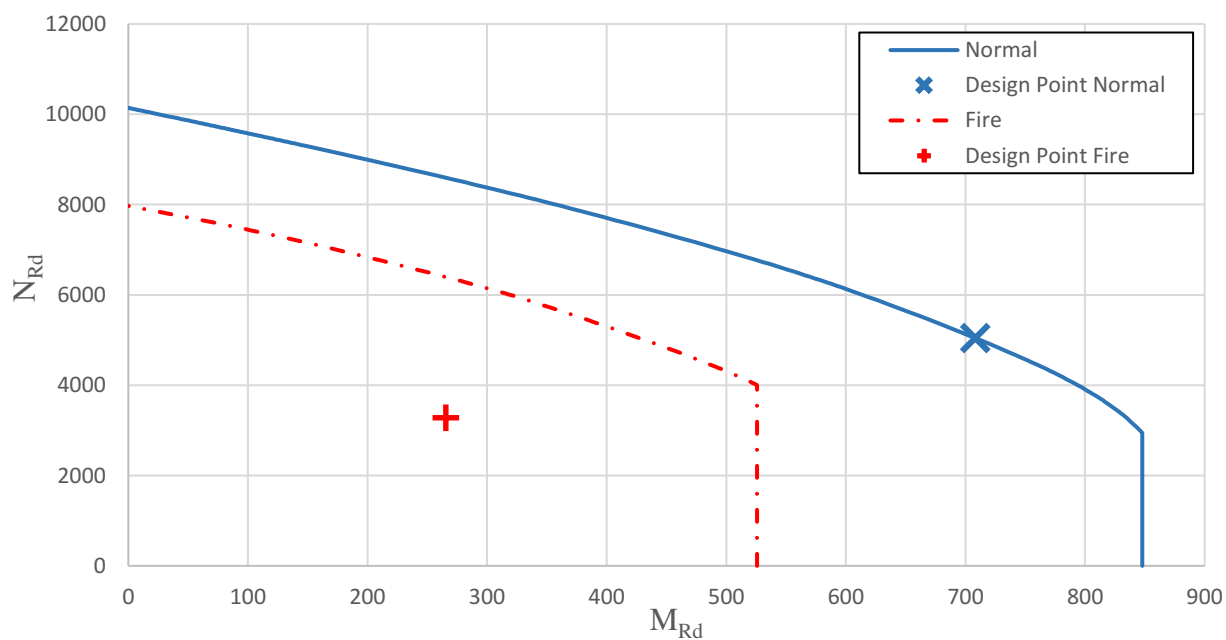



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 6 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R30 | B500B, 8T25, c =20 | REV DATE |

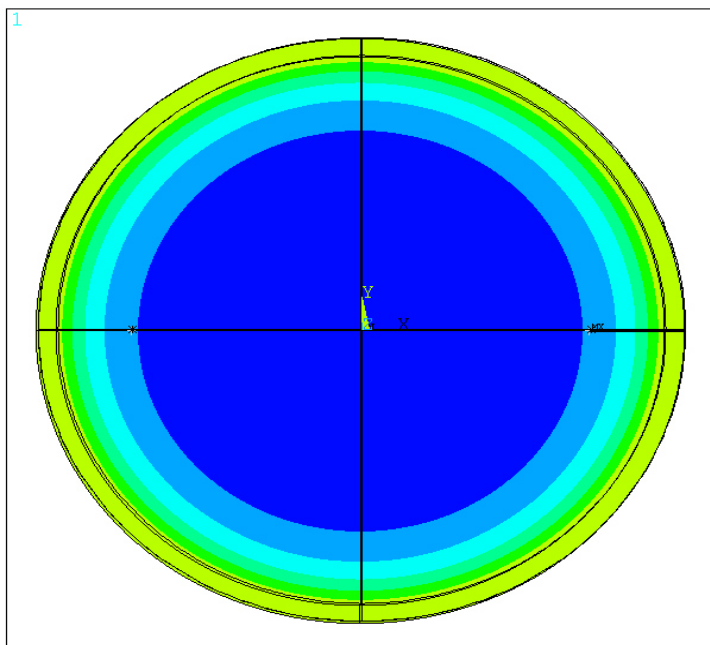
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =360
 TIME=1800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =20.653
 SMK =841.796
 20.653
 111.891
 203.129
 294.367
 385.605
 476.843
 568.082
 659.32
 750.558
 841.796

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 5020 | 3263 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -708,2 | -265,4 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 354,1 | 132,7 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 5042 | 3282 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 708,2 | 265,4 | kNm |

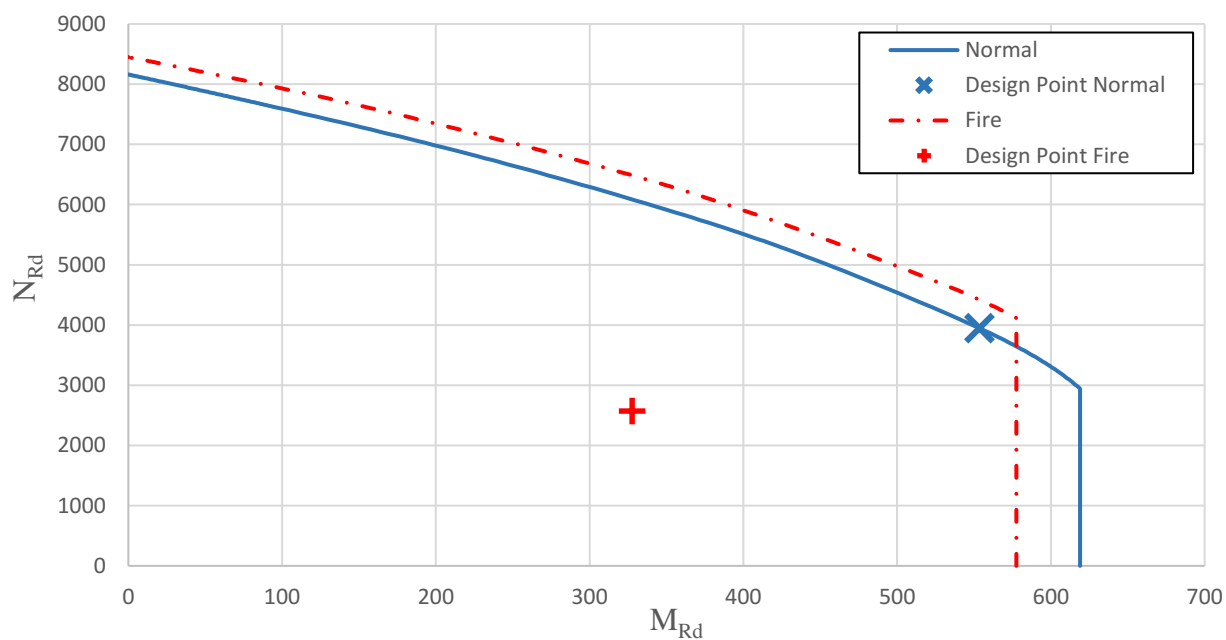



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 7 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R30 | B500B, 8T25, c =20 | REV DATE |

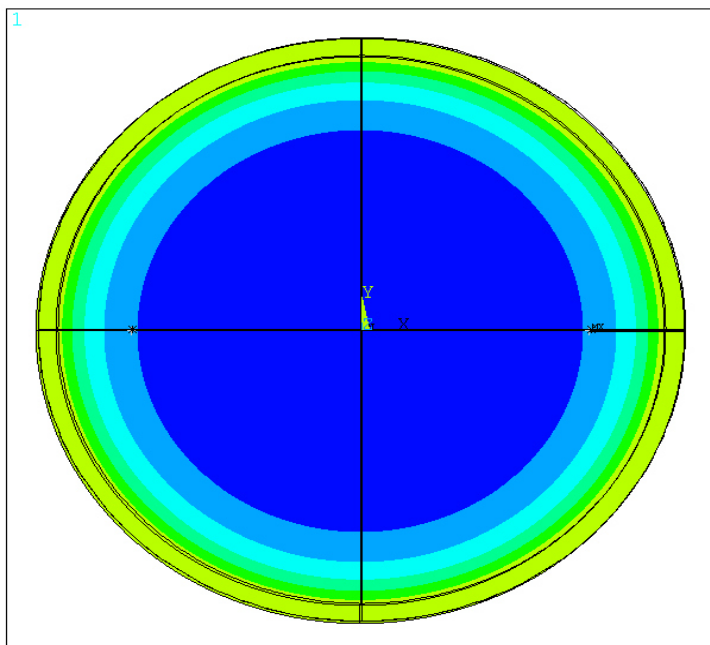
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =360
 TIME=1800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =20.5304
 SMK =841.796
 20.5304
 111.782
 203.034
 294.286
 385.537
 476.789
 568.041
 659.292
 750.544
 841.796

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3924 | 2551 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -553,6 | -327,6 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 276,8 | 163,8 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3946 | 2570 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 553,6 | 327,6 | kNm |

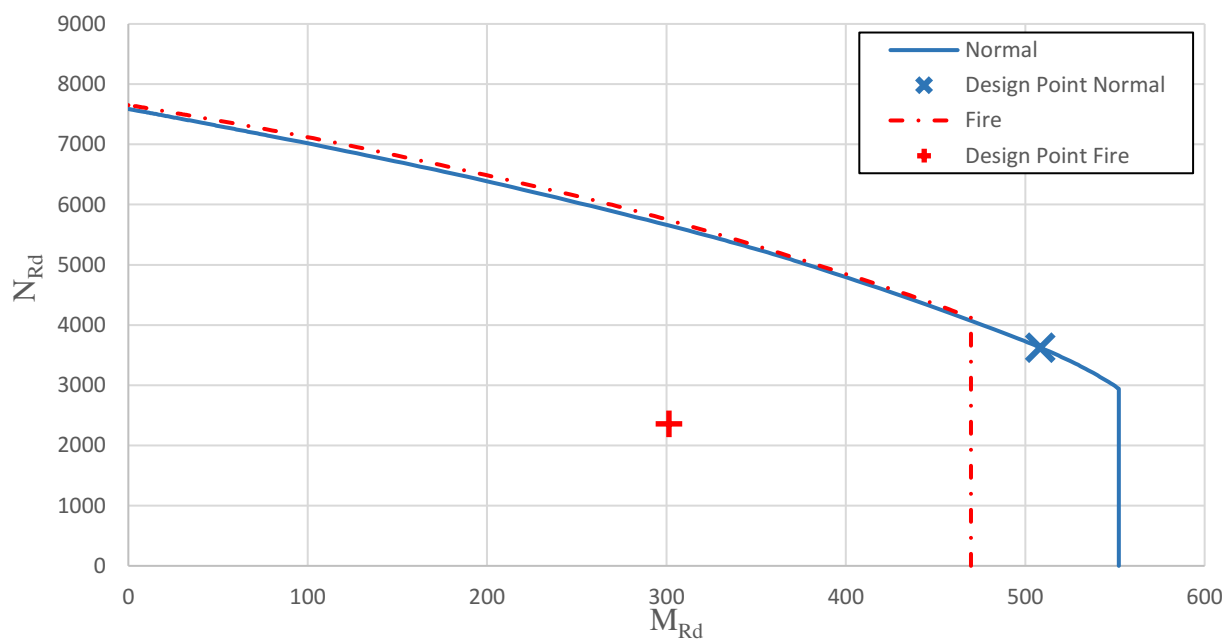



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 8 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R30 | B500B, 8T25, c =20 | REV REV DATE |

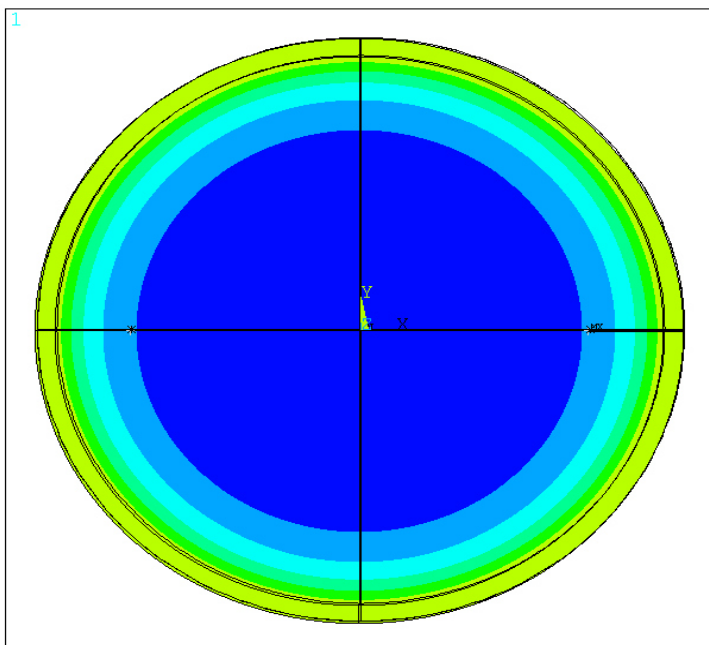
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =360
 TIME=1800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =20.5113
 SMK =841.796
 20.5113
 111.765
 203.019
 294.273
 385.527
 476.781
 568.034
 659.288
 750.542
 841.796

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3603 | 2342 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -508,3 | -301,4 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 254,1 | 150,7 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3625 | 2361 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 508,3 | 301,4 | kNm |

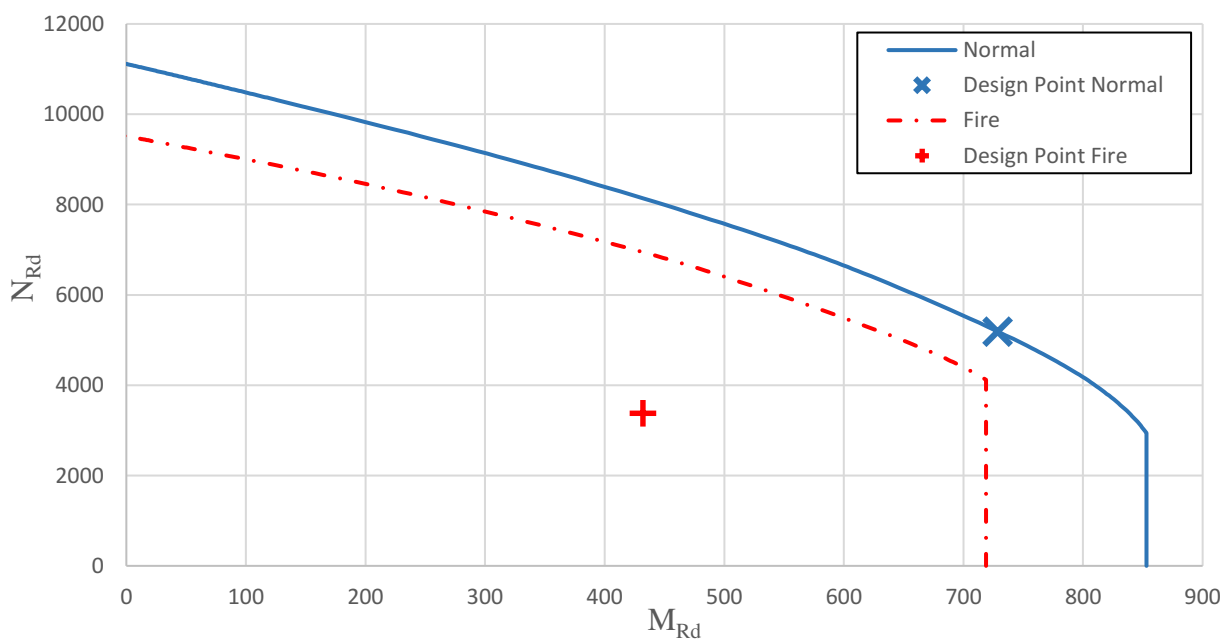



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 9 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R30 | B500B, 8T25, c =20 | REV REV DATE |

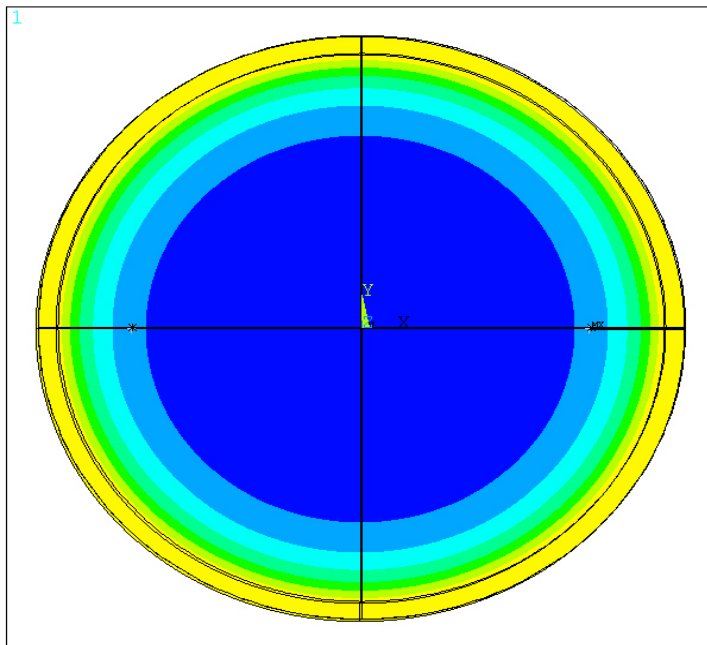
Steel**1.4462**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =360
 TIME=1800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =20.5113
 SMK =841.796
 20.5113
 111.765
 203.019
 294.273
 385.527
 476.781
 568.034
 659.288
 750.542
 841.796

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 5165 | 3357 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d,top}$ | -728,7 | -432,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d,bot}$ | 364,3 | 216,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 5187 | 3376 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 728,7 | 432,0 | kNm |

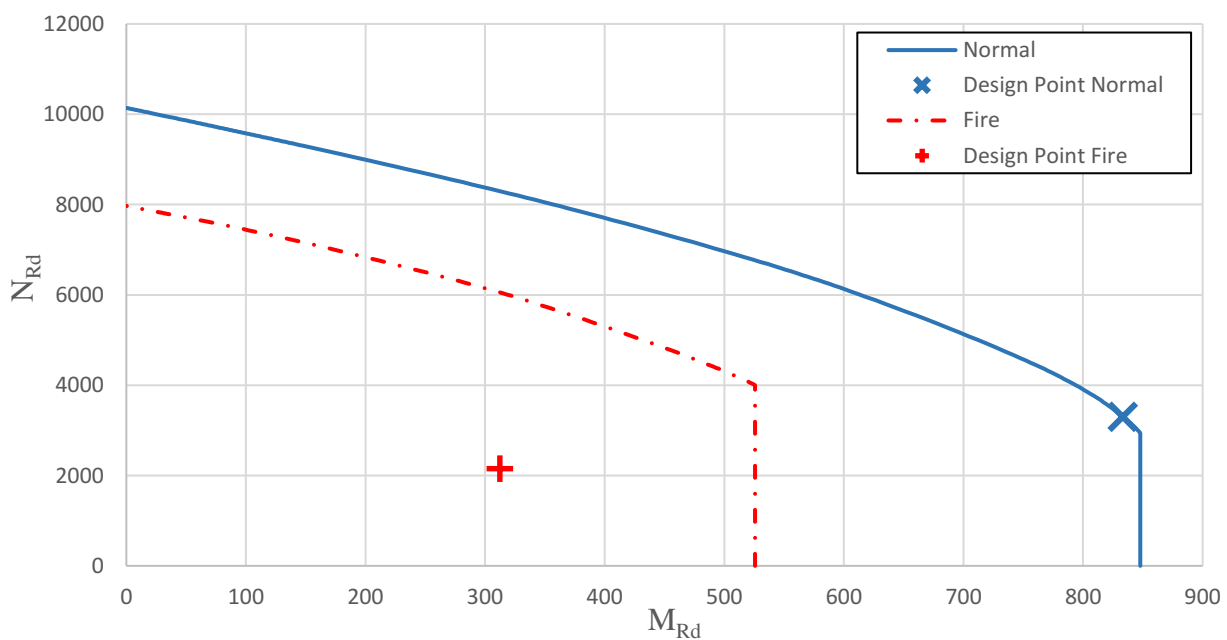



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 10 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R30 | B500B, 8T25, c =20 | REV DATE |

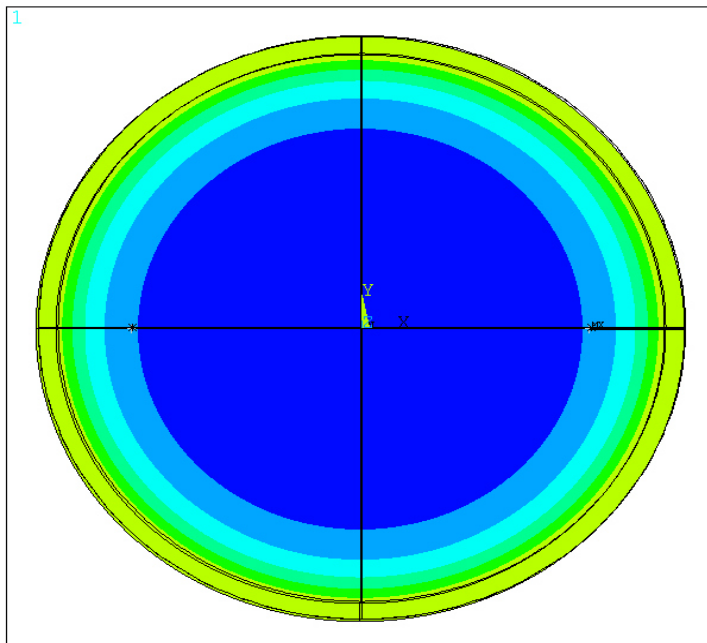
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =360
 TIME=1800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =20.653
 SMK =841.796
 20.653
 111.891
 203.129
 294.367
 385.605
 476.843
 568.082
 659.32
 750.558
 841.796

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3279 | 2131 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -833,3 | -312,3 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 416,7 | 156,2 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3301 | 2150 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 833,3 | 312,3 | kNm |

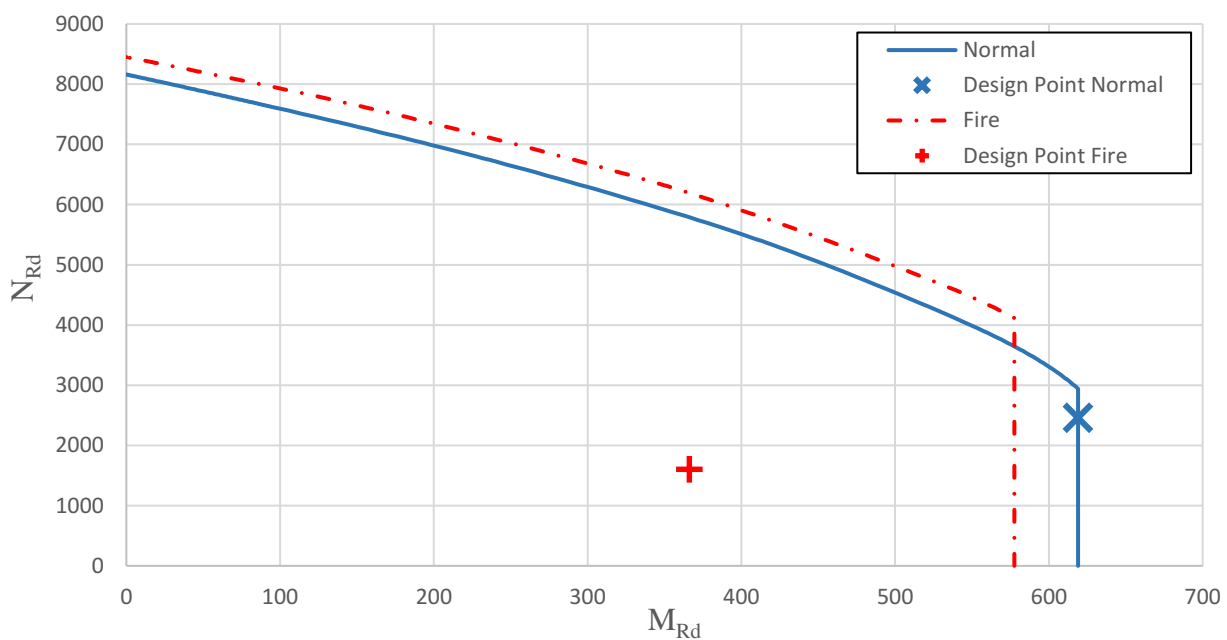



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 11 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R30 | B500B, 8T25, c =20 | REV DATE |

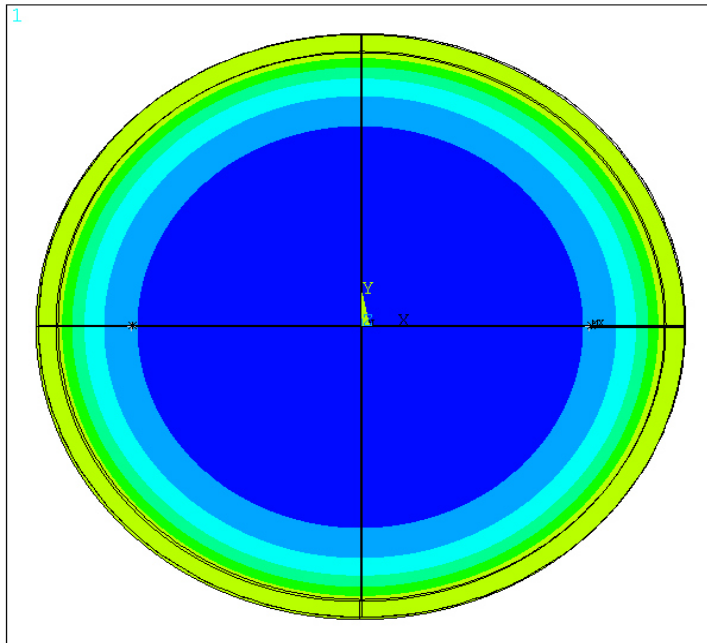
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =360
 TIME=1800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =20.5304
 SMK =841.796
 20.5304
 111.782
 203.034
 294.286
 385.537
 476.789
 568.041
 659.292
 750.544
 841.796

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2435 | 1583 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -618,8 | -366,2 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 309,4 | 183,1 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2457 | 1602 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 618,8 | 366,2 | kNm |

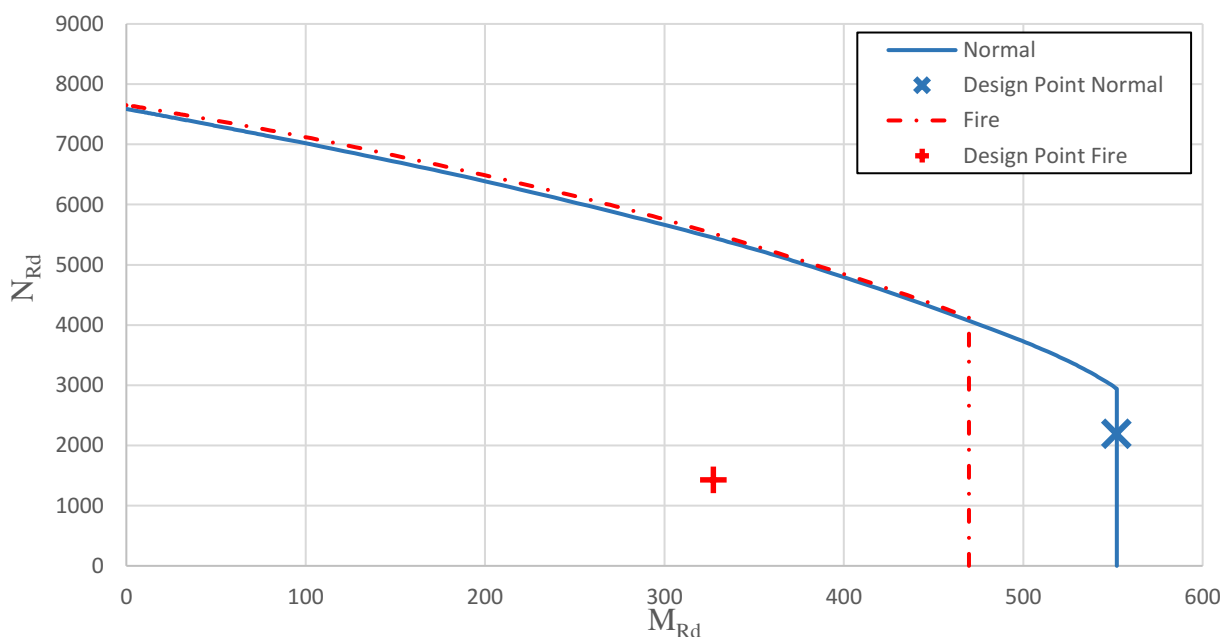



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 12 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R30 | B500B, 8T25, c =20 | REV REV DATE |

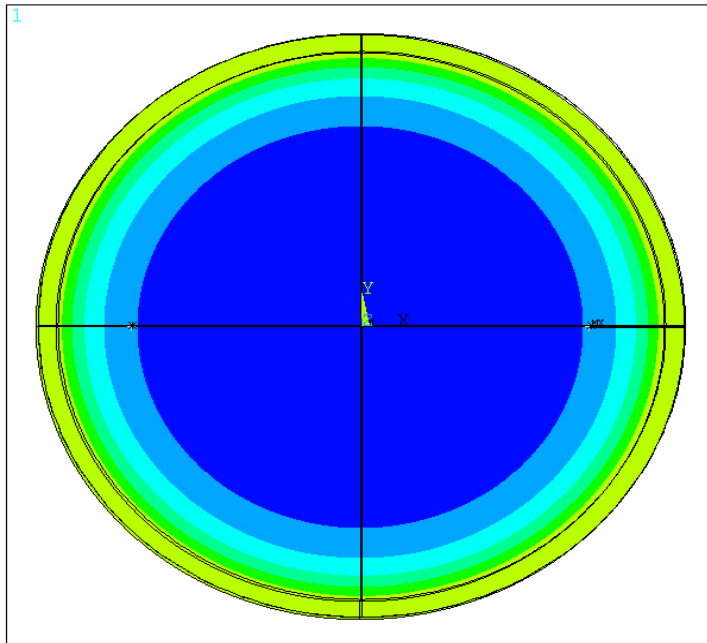
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =360
 TIME=1800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =20.5113
 SMX =841.796
 20.5113
 111.765
 203.019
 294.273
 385.527
 476.781
 568.034
 659.288
 750.542
 841.796

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2172 | 1412 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -552,0 | -327,3 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 276,0 | 163,6 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2194 | 1431 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 552,0 | 327,3 | kNm |

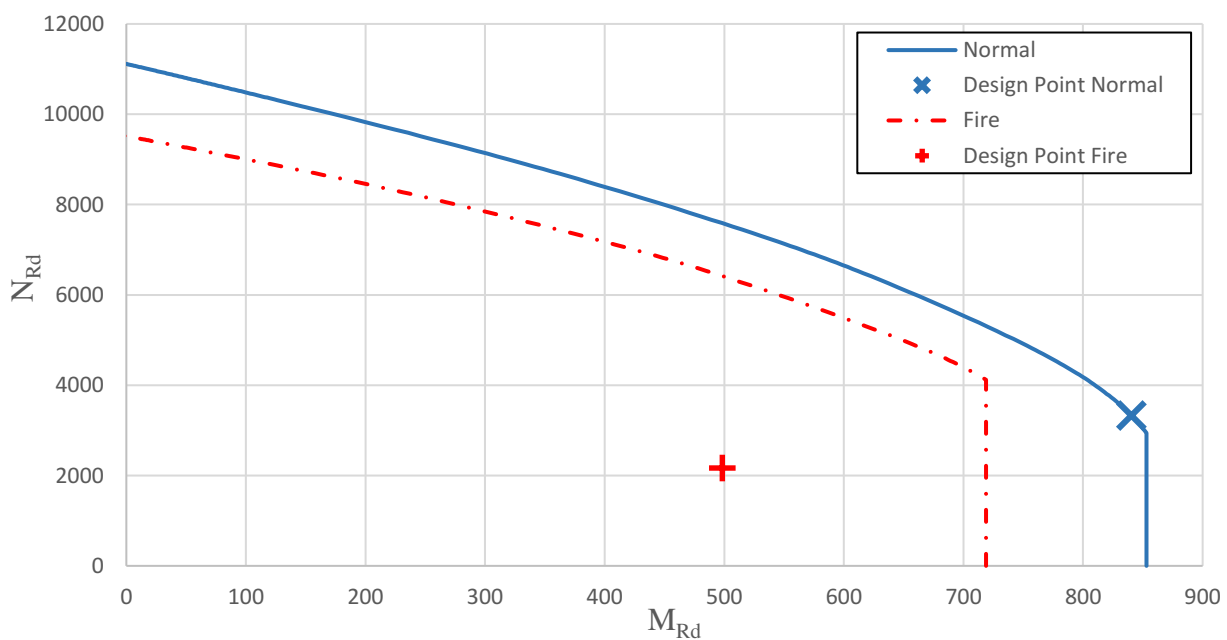


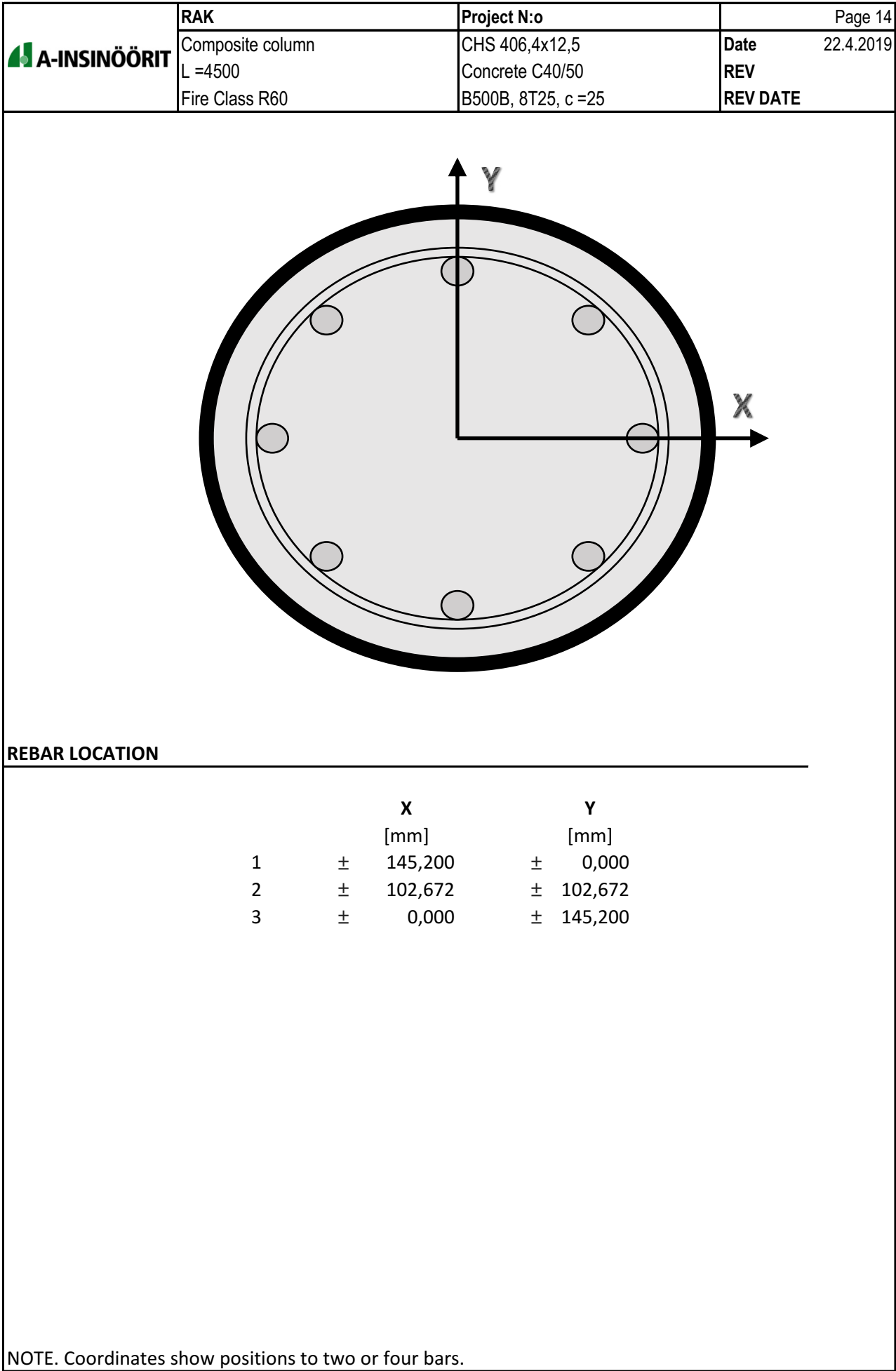
| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 13 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R30 | B500B, 8T25, c =20 | REV REV DATE |


Steel**1.4462**

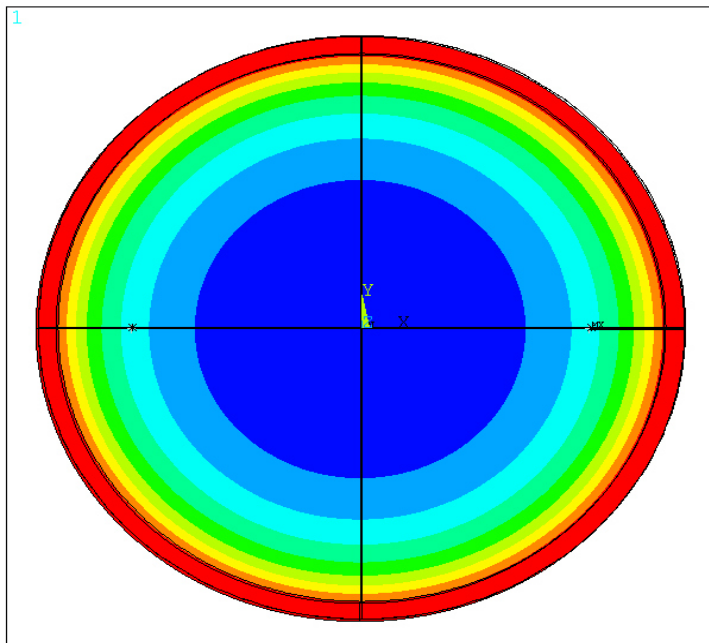
ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =360
 TIME=1800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =20.5113
 SMK =841.796
 20.5113
 111.765
 203.019
 294.273
 385.527
 476.781
 568.034
 659.288
 750.542
 841.796

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3307 | 2150 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -840,4 | -498,3 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 420,2 | 249,2 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3329 | 2169 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 840,4 | 498,3 | kNm |



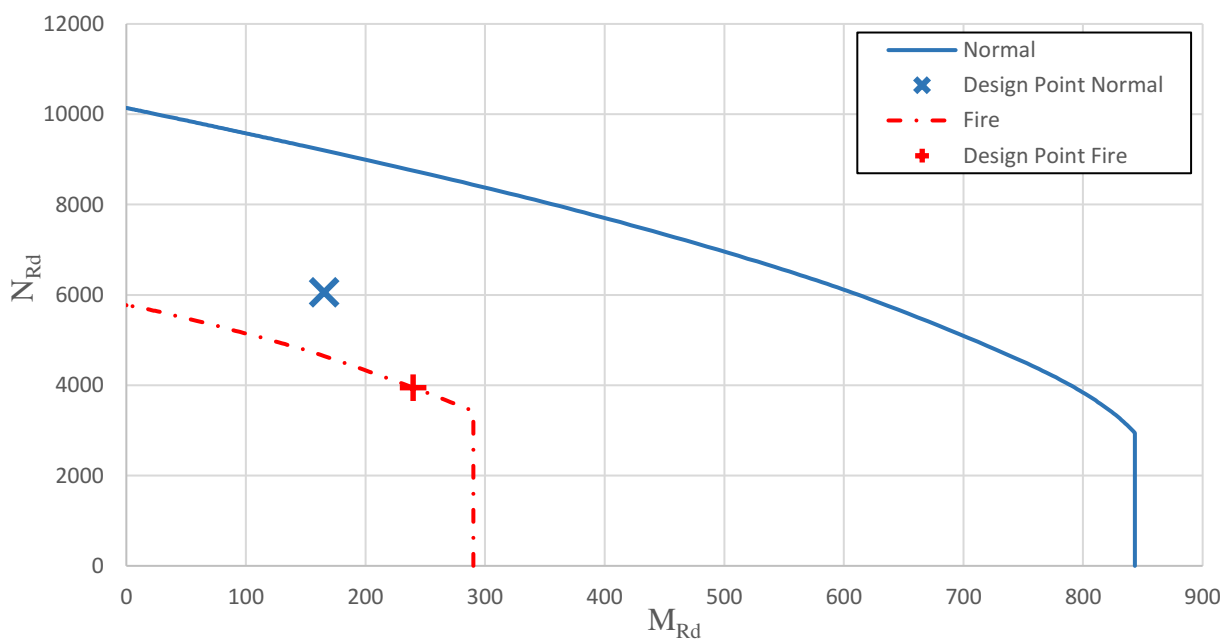



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 15 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R60 | B500B, 8T25, c =25 | REV DATE |

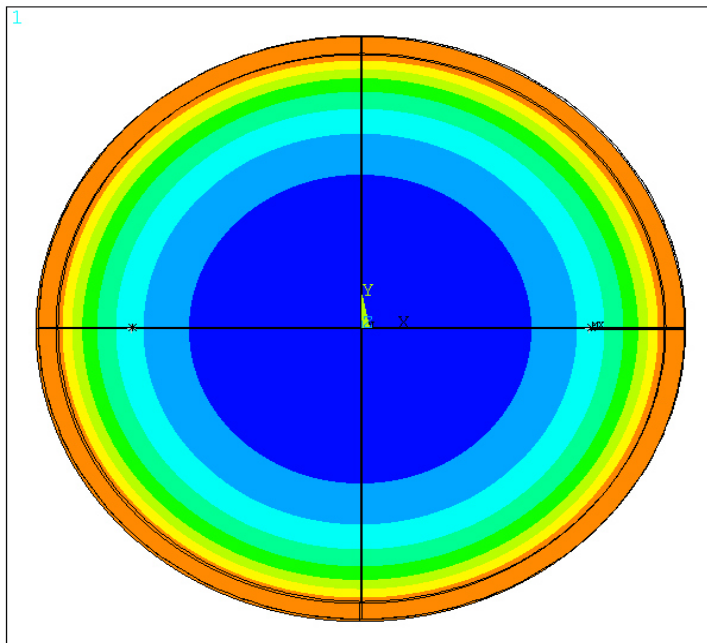
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =720
 TIME=3600
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =43.9
 SMX =945.34
 43.9
 144.06
 244.22
 344.38
 444.54
 544.7
 644.86
 745.02
 845.18
 945.34

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 6039 | 3925 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 6061 | 3944 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 165,3 | 239,9 | kNm |

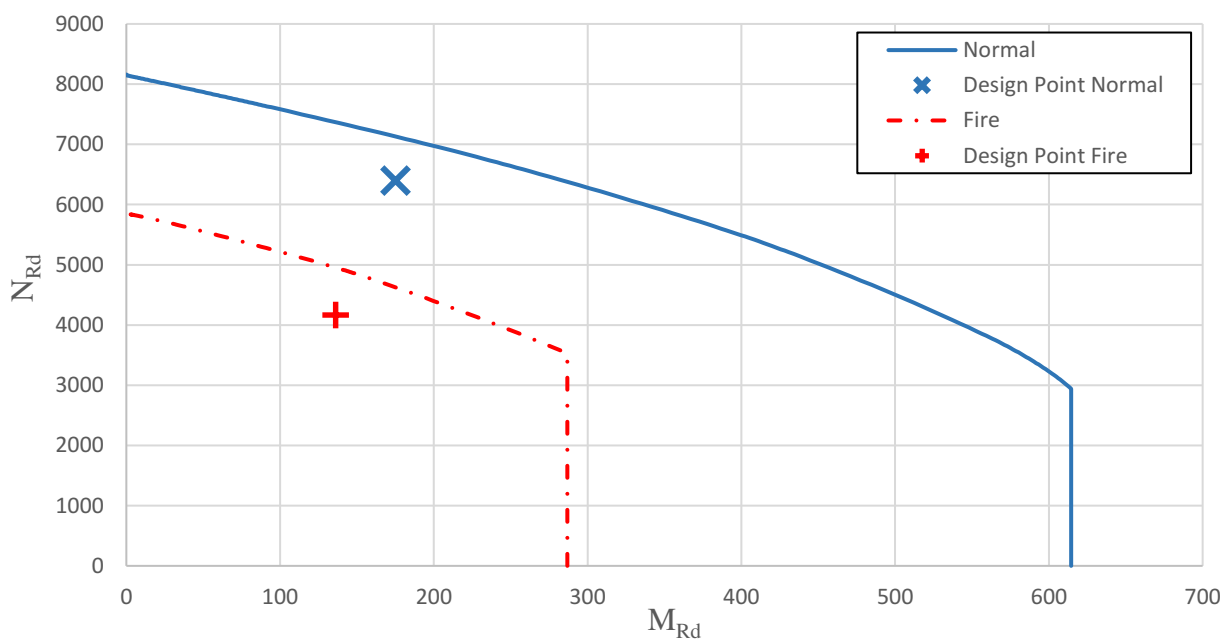



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 16 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R60 | B500B, 8T25, c =25 | REV REV DATE |

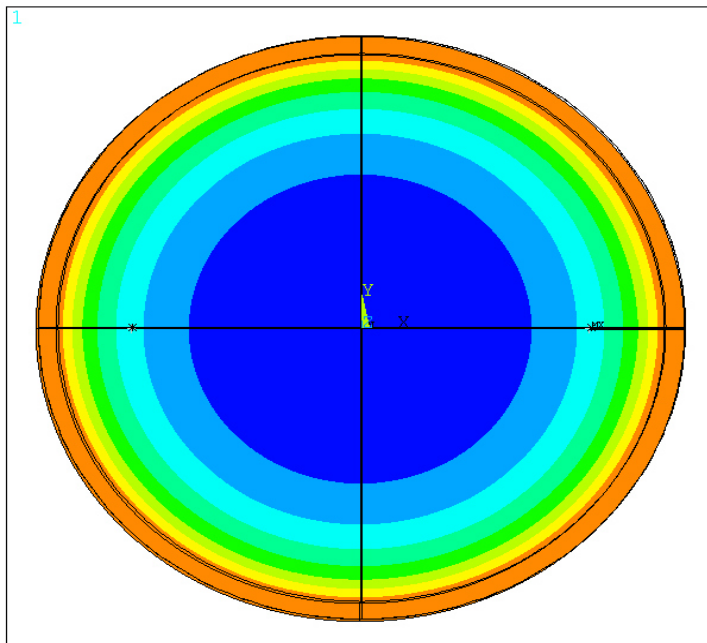
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =720
 TIME=3600
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =40.7075
 SMK =945.34
 40.7075
 141.222
 241.737
 342.252
 442.766
 543.281
 643.796
 744.311
 844.825
 945.34

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 6378 | 4146 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 6400 | 4165 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 175,2 | 136,2 | kNm |

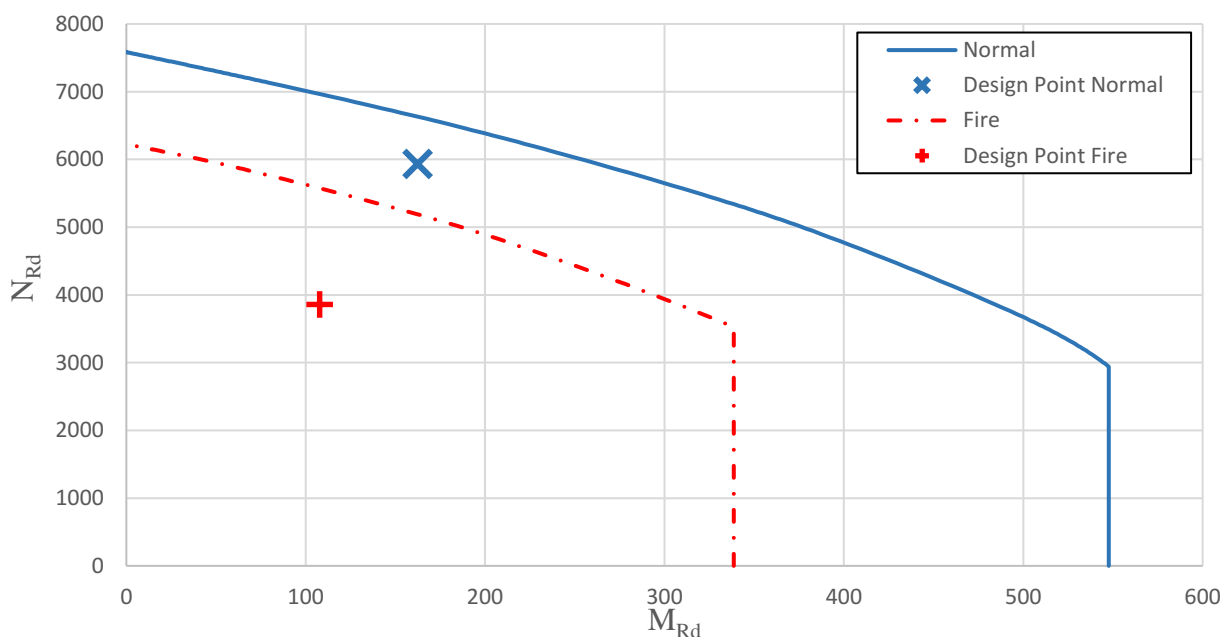



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 17 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R60 | B500B, 8T25, c =25 | REV REV DATE |

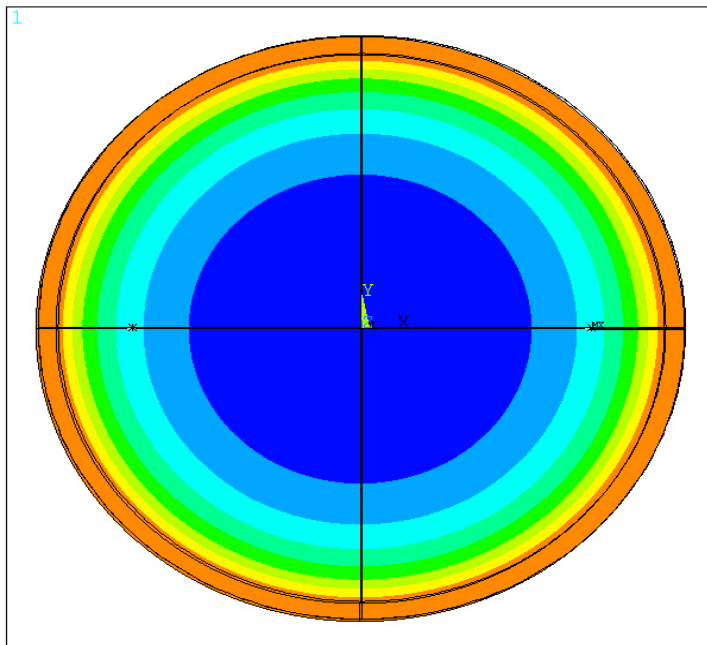
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =720
 TIME=3600
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =40.4435
 SMK =945.34
 40.4435
 140.988
 241.532
 342.076
 442.62
 543.164
 643.708
 744.252
 844.796
 945.34

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 5910 | 3842 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 5932 | 3861 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 162,4 | 107,7 | kNm |

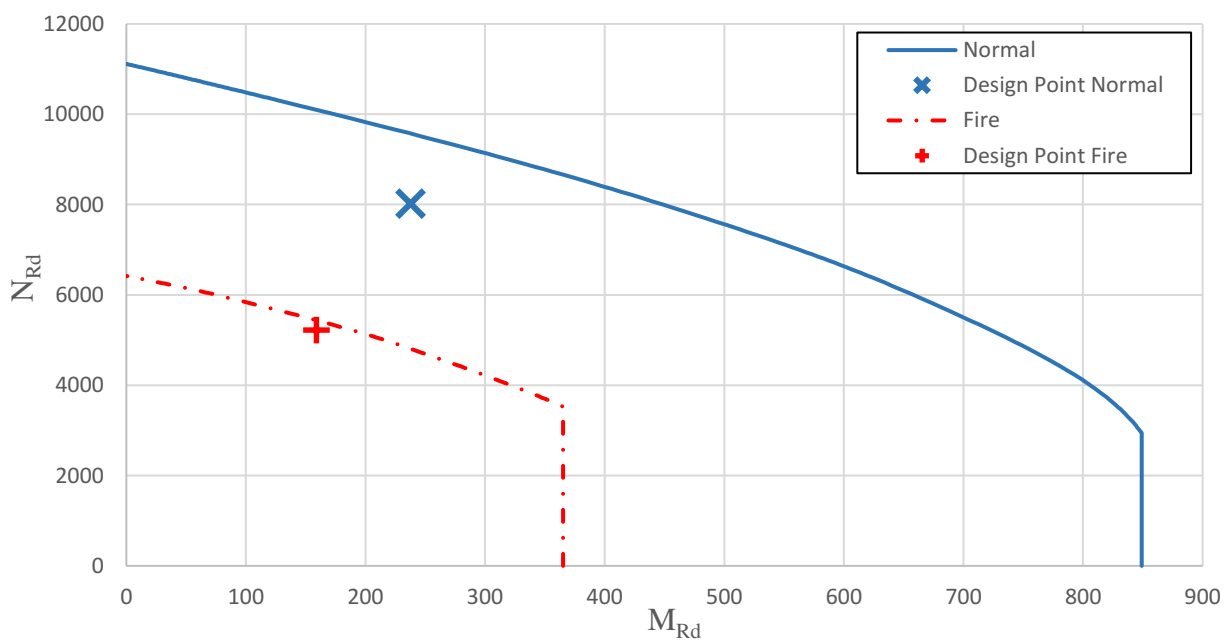



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 18 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R60 | B500B, 8T25, c =25 | REV REV DATE |

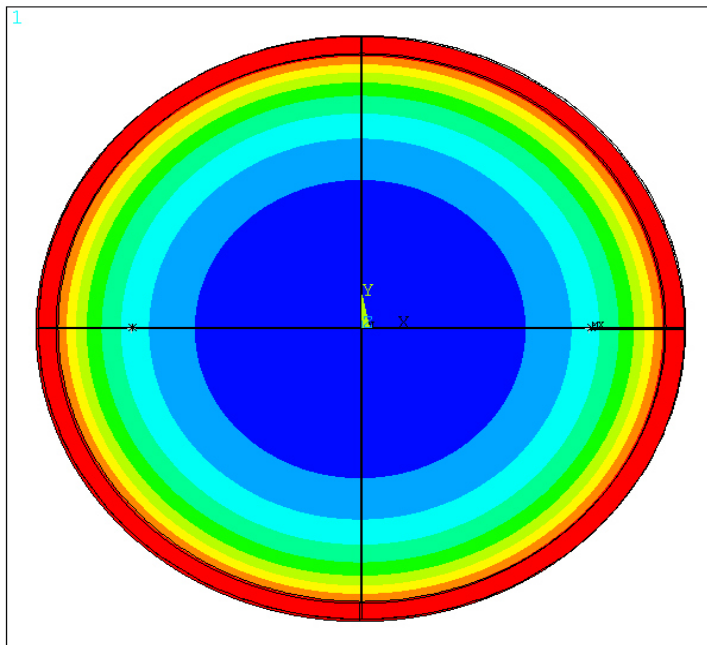
Steel**1.4462**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =720
 TIME=3600
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =40.4435
 SMK =945.34
 40.4435
 140.988
 241.532
 342.076
 442.62
 543.164
 643.708
 744.252
 844.796
 945.34

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 7999 | 5199 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 8021 | 5218 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 237,7 | 159,1 | kNm |

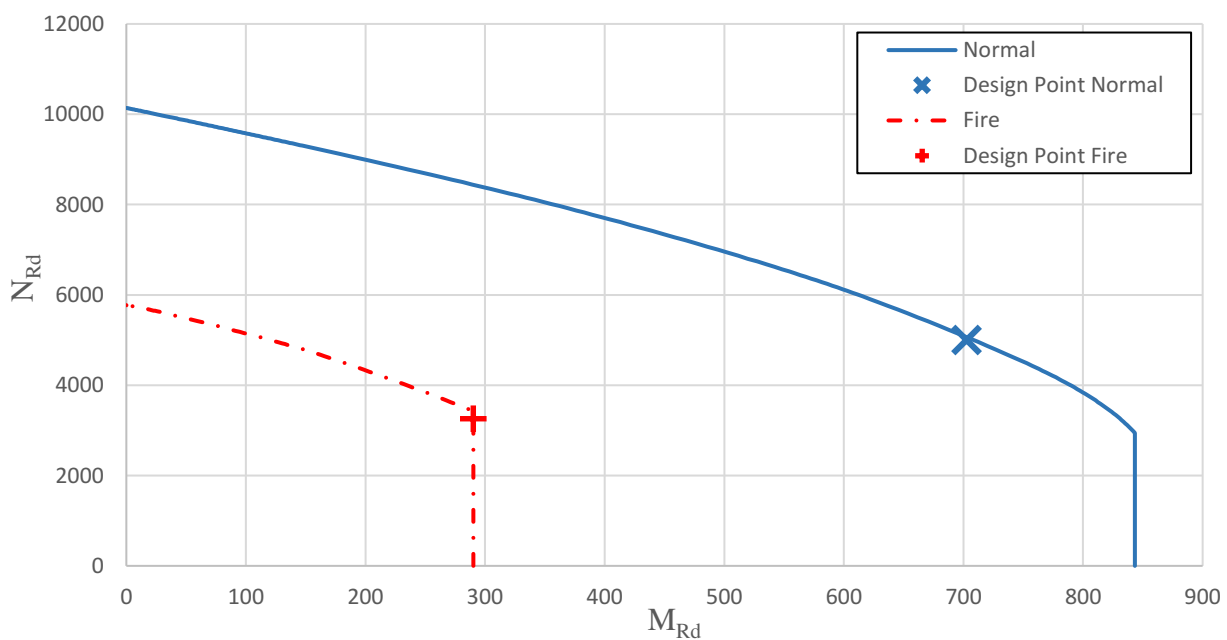



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 19 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R60 | B500B, 8T25, c =25 | REV DATE |

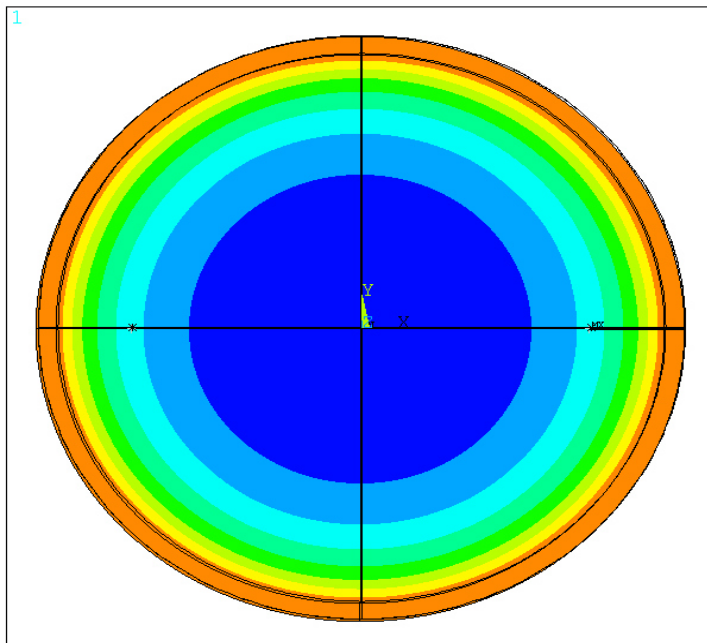
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =720
 TIME=3600
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =43.9
 SMX =945.34
 43.9
 144.06
 244.22
 344.38
 444.54
 544.7
 644.86
 745.02
 845.18
 945.34

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 4981 | 3238 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -702,7 | -149,9 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 351,3 | 75,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 5003 | 3257 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 702,7 | 290,2 | kNm |

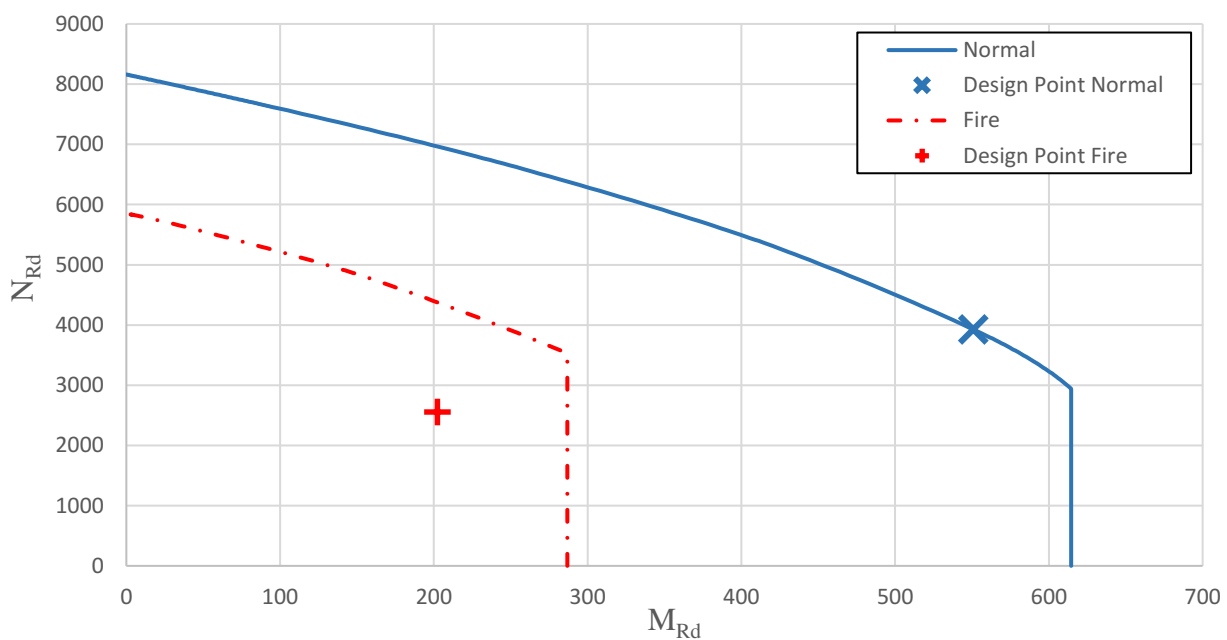



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 20 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R60 | B500B, 8T25, c =25 | REV DATE |

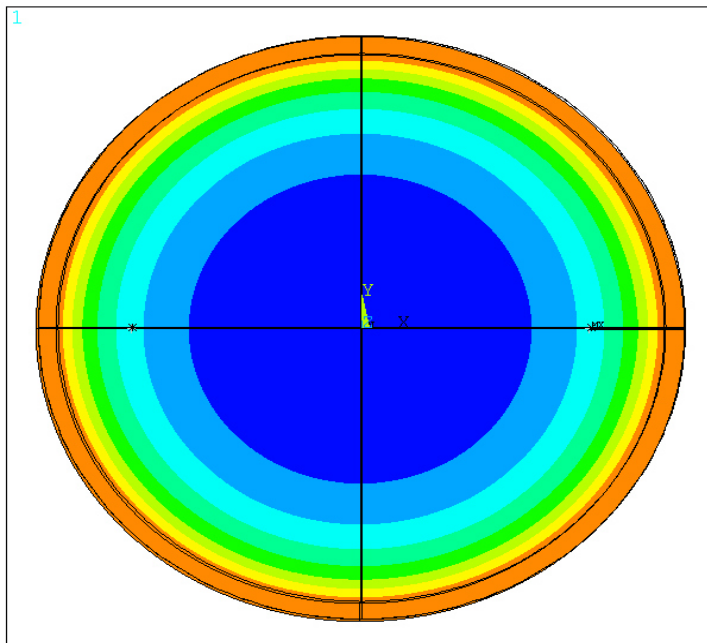
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =720
 TIME=3600
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =40.7075
 SMX =945.34
 40.7075
 141.222
 241.737
 342.252
 442.766
 543.281
 643.796
 744.311
 844.825
 945.34

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3904 | 2538 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d,top}$ | -550,8 | -202,3 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d,bot}$ | 275,4 | 101,2 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3926 | 2557 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 550,8 | 202,3 | kNm |

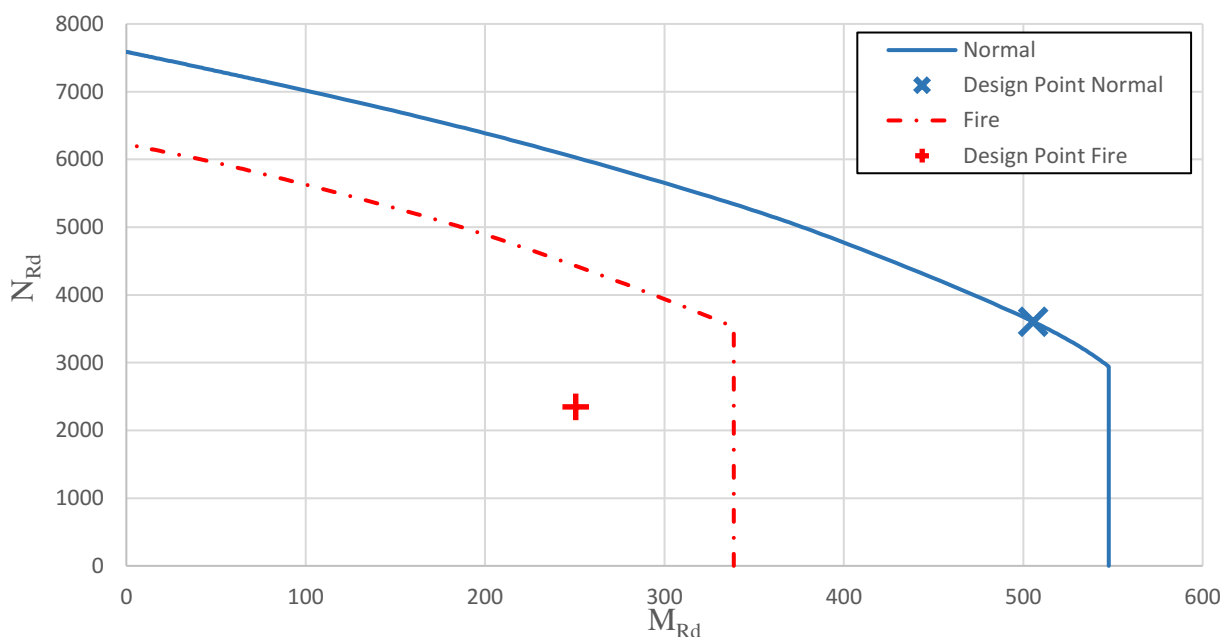



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 21 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R60 | B500B, 8T25, c =25 | REV REV DATE |

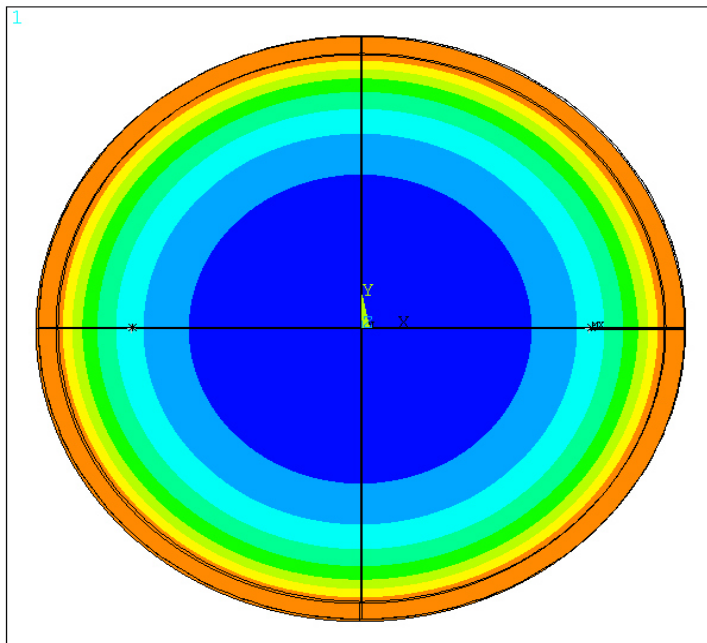
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =720
 TIME=3600
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =40.4435
 SMK =945.34
 40.4435
 140.988
 241.532
 342.076
 442.62
 543.164
 643.708
 744.252
 844.796
 945.34

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3583 | 2329 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d,top}$ | -505,5 | -250,5 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d,bot}$ | 252,7 | 125,3 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3605 | 2348 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 505,5 | 250,5 | kNm |

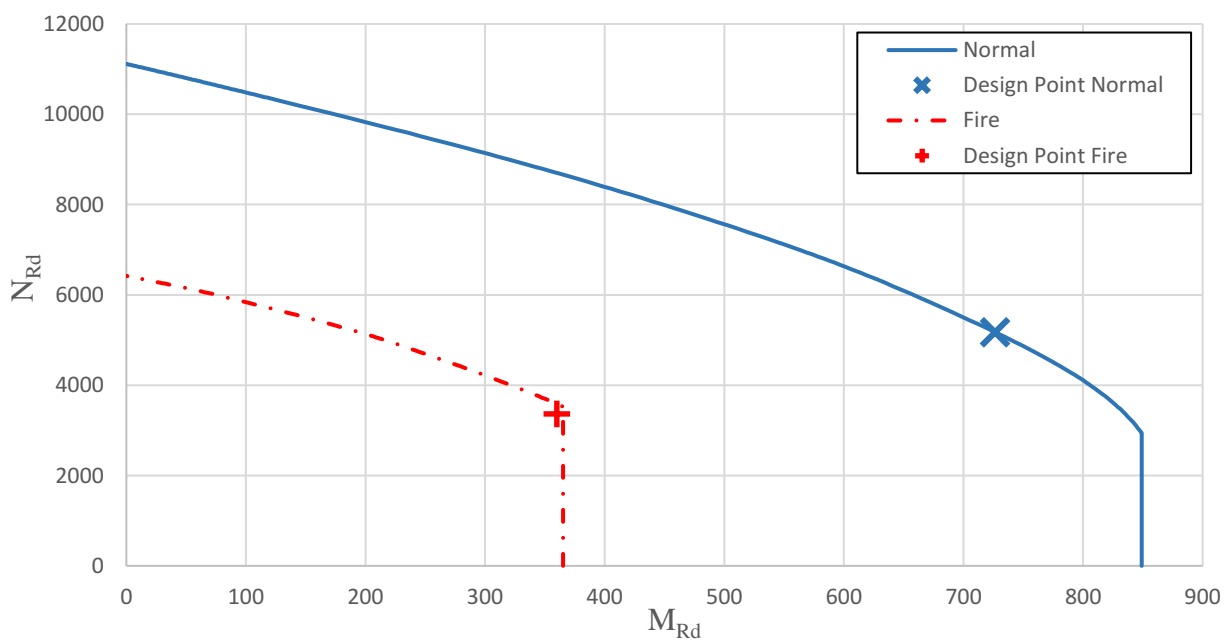



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 22 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R60 | B500B, 8T25, c =25 | REV DATE |

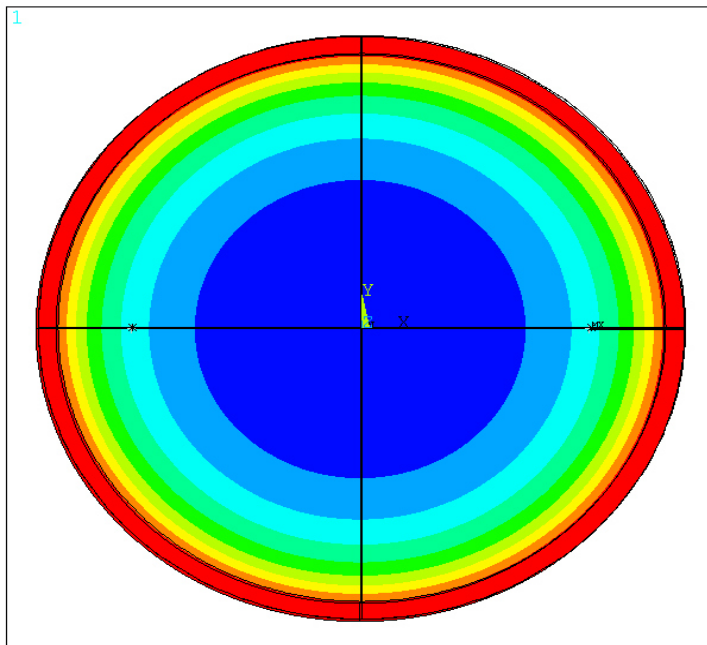
Steel**1.4462**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =720
 TIME=3600
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =40.4435
 SMK =945.34
 40.4435
 140.988
 241.532
 342.076
 442.62
 543.164
 643.708
 744.252
 844.796
 945.34

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 5150 | 3348 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -726,5 | -360,1 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 363,3 | 180,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 5172 | 3367 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 726,5 | 360,1 | kNm |

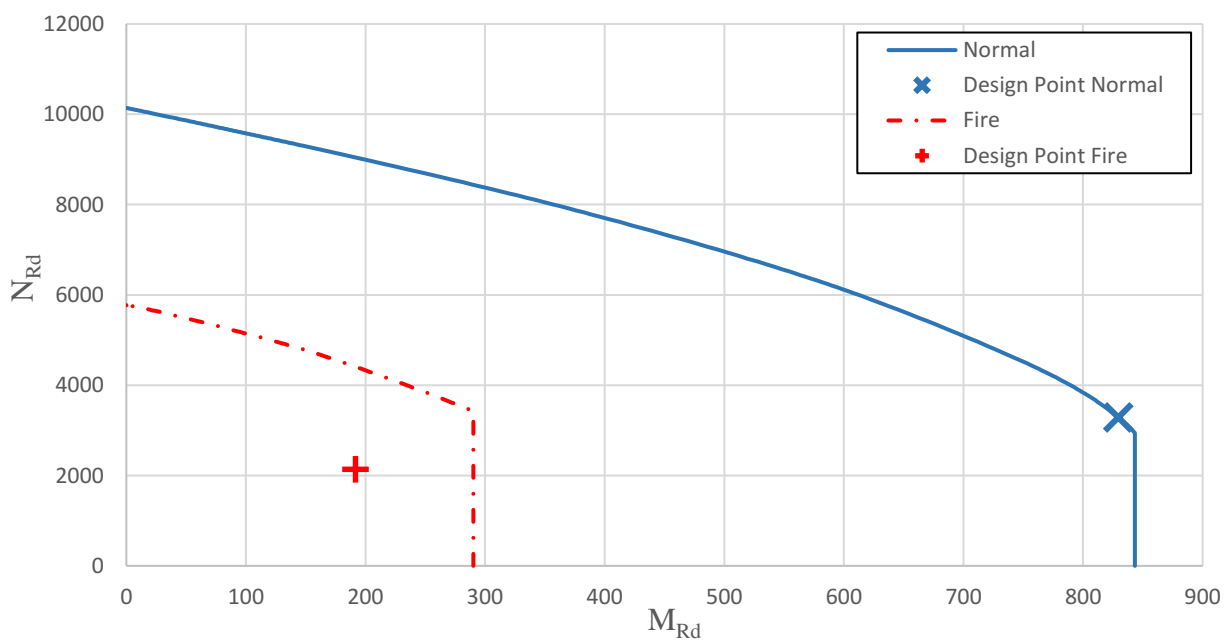



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 23 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R60 | B500B, 8T25, c =25 | REV REV DATE |

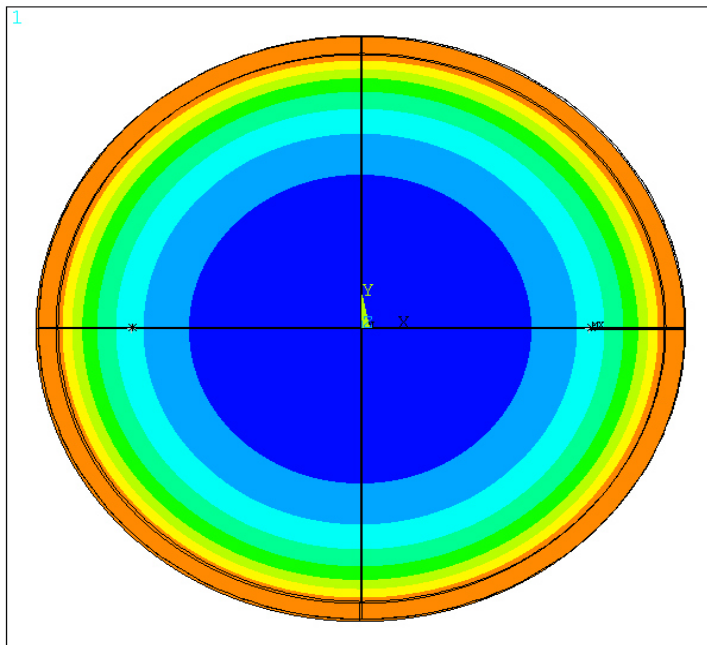
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =720
 TIME=3600
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =43.9
 SMK =945.34
 43.9
 144.06
 244.22
 344.38
 444.54
 544.7
 644.86
 745.02
 845.18
 945.34

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3264 | 2122 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -829,5 | -177,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 414,7 | 88,5 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3286 | 2141 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 829,5 | 191,5 | kNm |

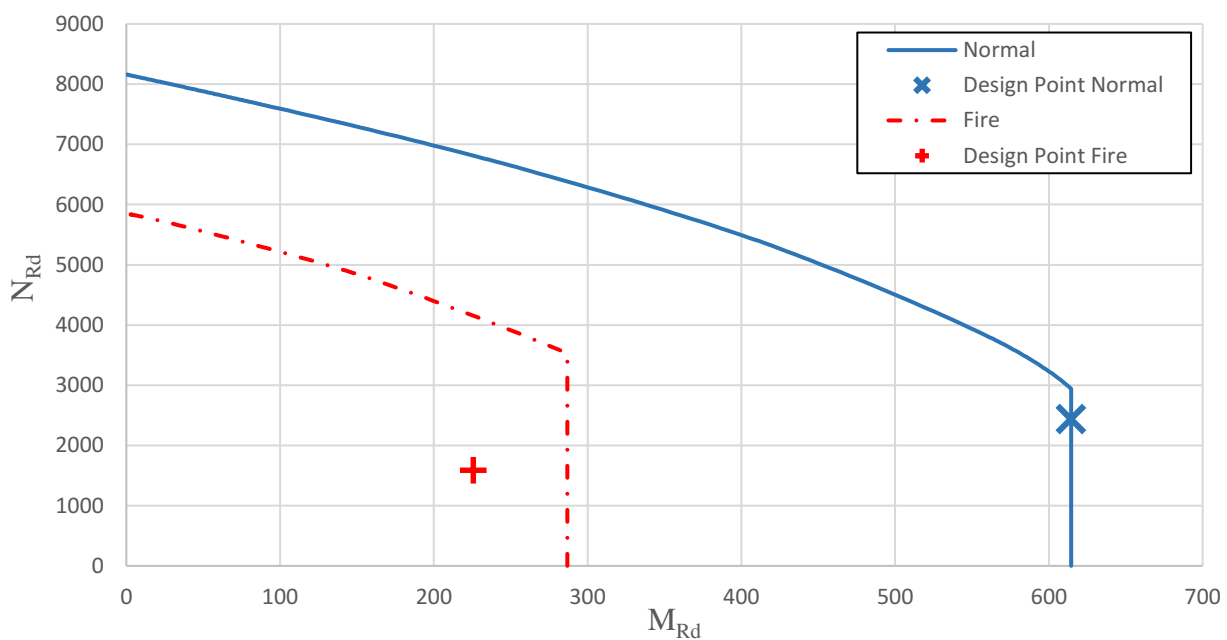



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 24 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R60 | B500B, 8T25, c =25 | REV REV DATE |

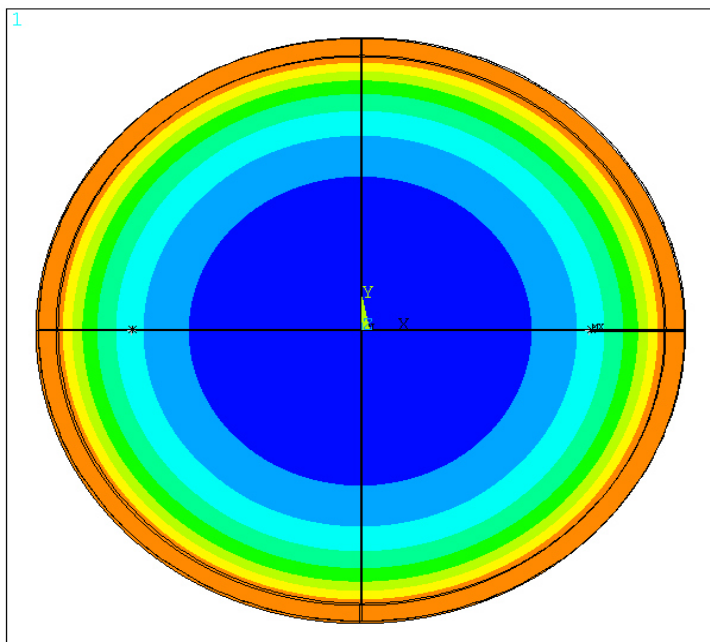
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =720
 TIME=3600
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =40.7075
 SMX =945.34
 40.7075
 141.222
 241.737
 342.252
 442.766
 543.281
 643.796
 744.311
 844.825
 945.34

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2417 | 1571 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -614,2 | -225,7 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 307,1 | 112,8 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2439 | 1590 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 614,2 | 225,7 | kNm |

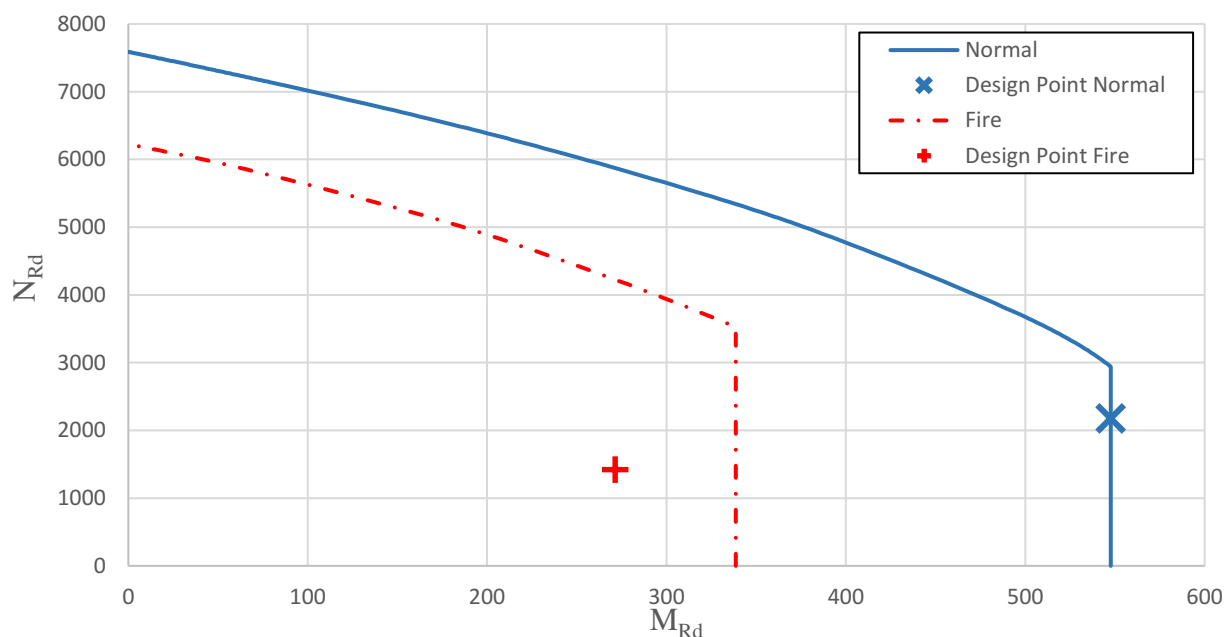



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 25 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R60 | B500B, 8T25, c =25 | REV DATE |

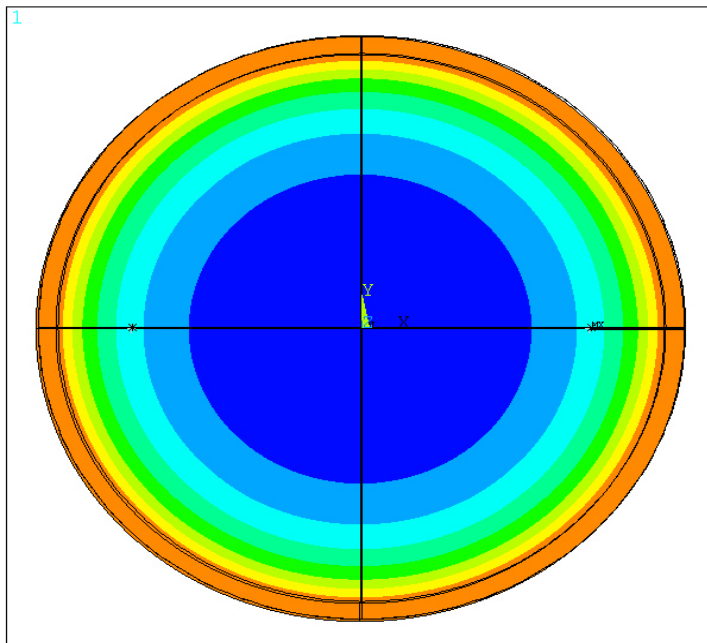
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =720
 TIME=3600
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =40.4435
 SMK =945.34
 40.4435
 140.988
 241.532
 342.076
 442.62
 543.164
 643.708
 744.252
 844.796
 945.34

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2155 | 1401 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -547,7 | -271,4 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 273,8 | 135,7 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2177 | 1420 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 547,7 | 271,4 | kNm |

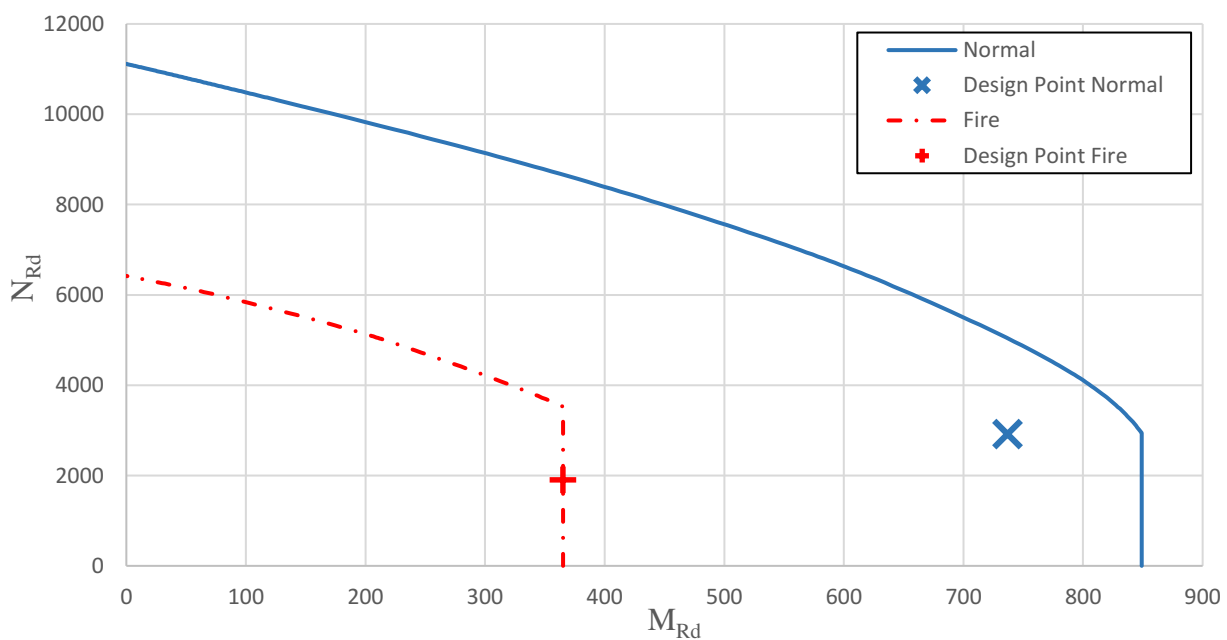


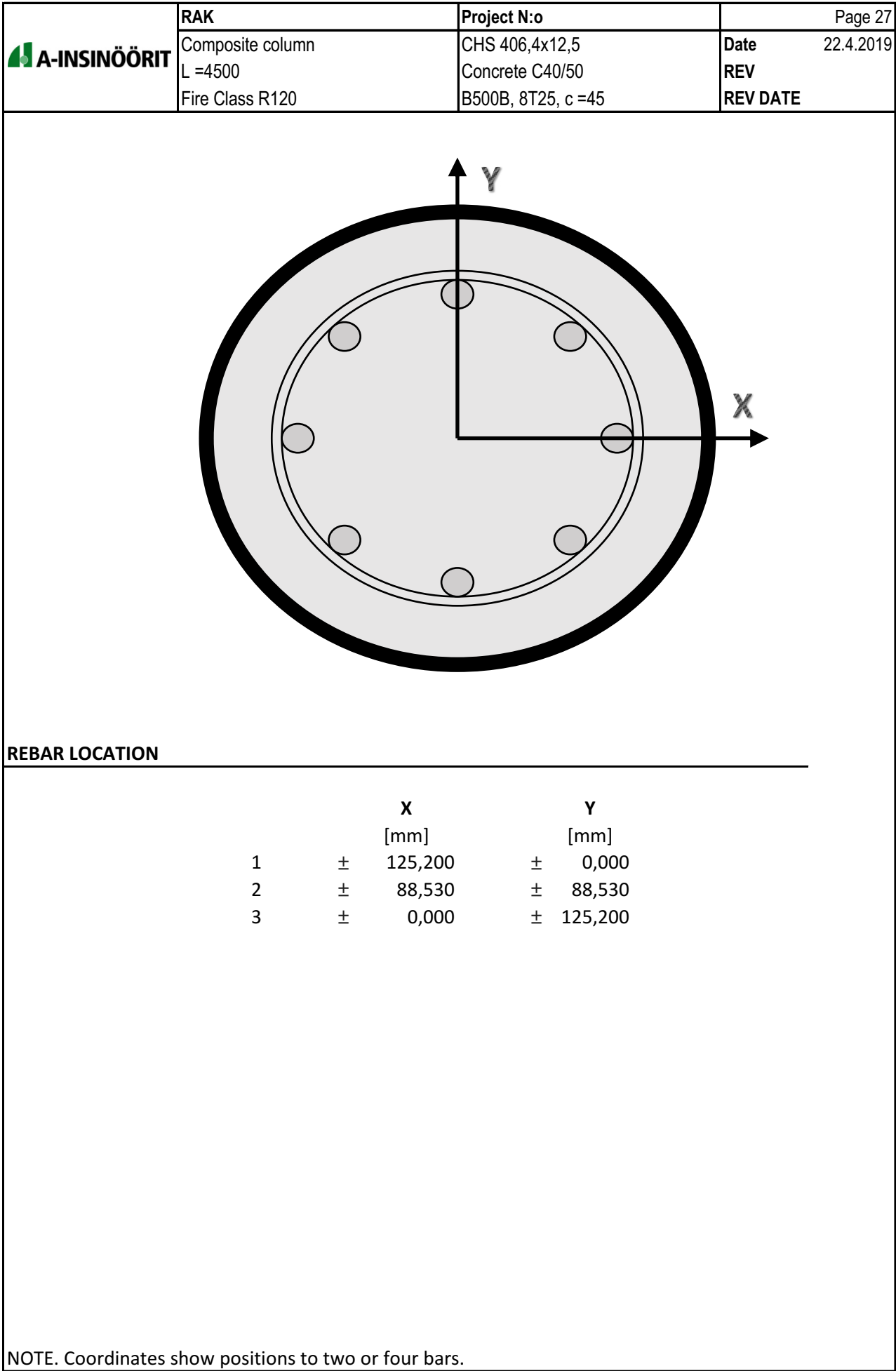
| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 26 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R60 | B500B, 8T25, c =25 | REV DATE |


Steel**1.4462**

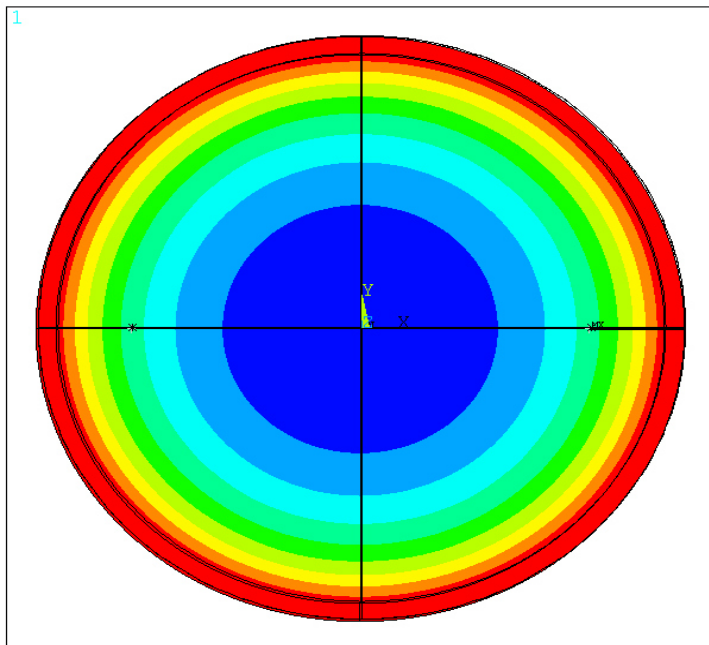
ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =720
 TIME=3600
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =40.4435
 SMK =945.34
 40.4435
 140.988
 241.532
 342.076
 442.62
 543.164
 643.708
 744.252
 844.796
 945.34

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2899 | 1884 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -736,7 | -365,1 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 368,4 | 182,6 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2921 | 1903 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 736,7 | 365,1 | kNm |



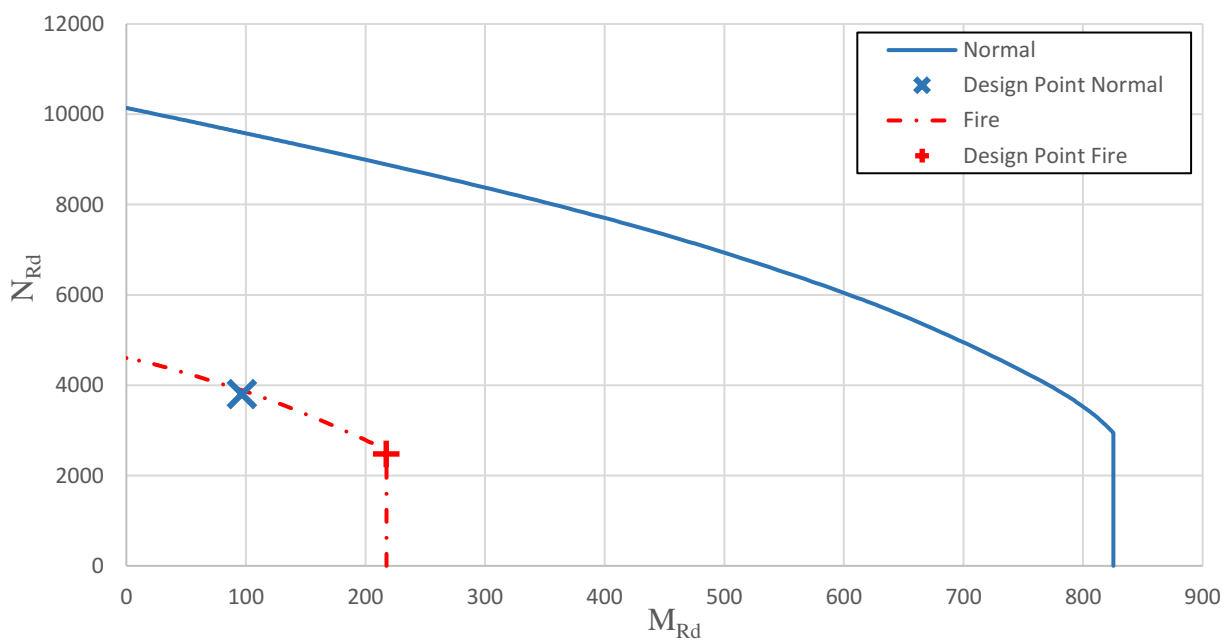



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 28 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R120 | B500B, 8T25, c =45 | REV REV DATE |

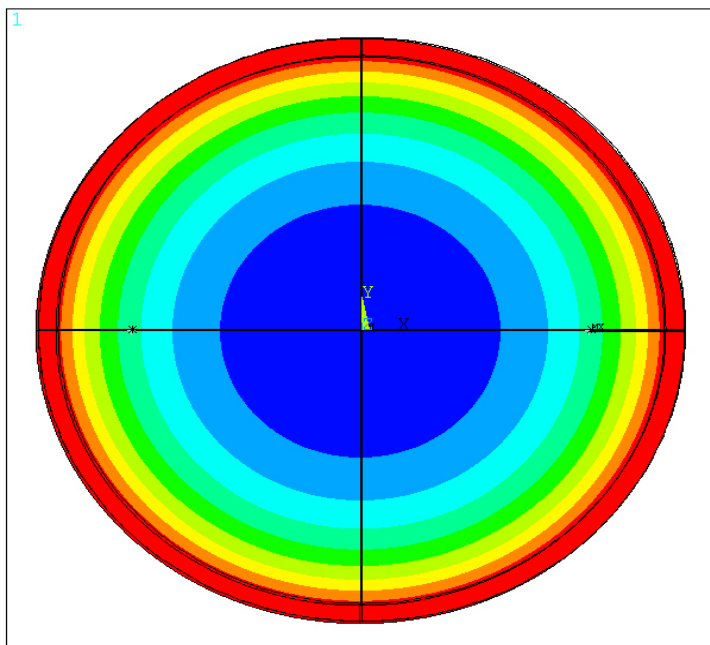
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1440
 TIME=7200
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =162.506
 SMX =1049.04
 162.506
 261.009
 359.513
 458.017
 556.521
 655.025
 753.528
 852.032
 950.536
 1049.04

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3783 | 2459 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3805 | 2478 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 96,5 | 217,4 | kNm |

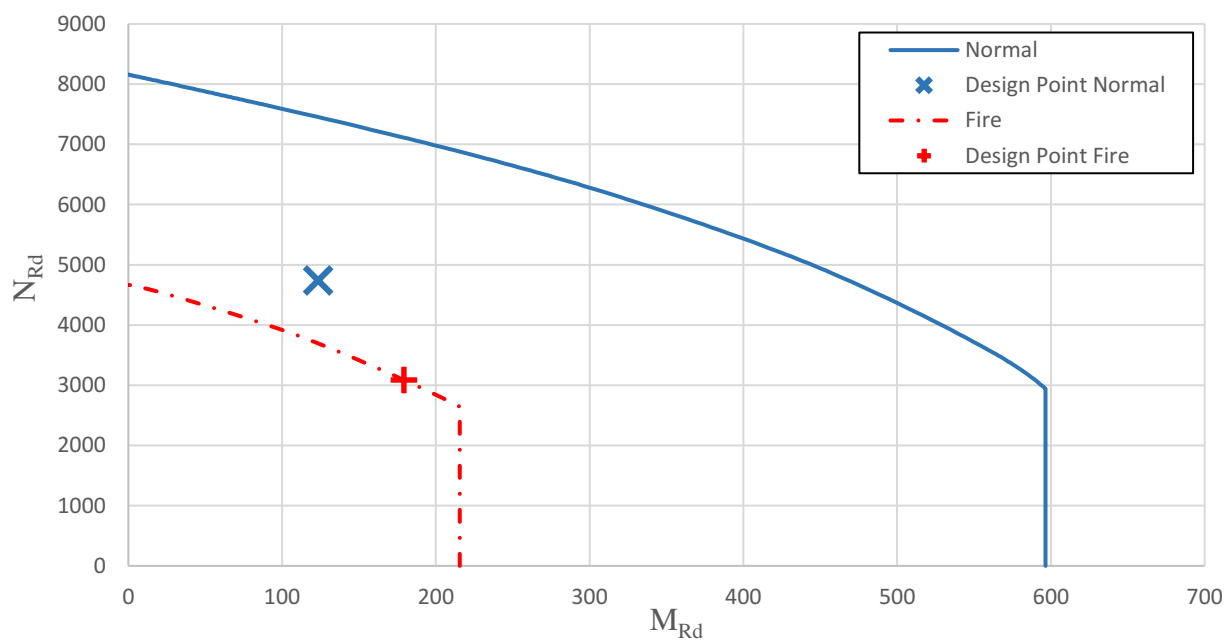



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 29 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R120 | B500B, 8T25, c =45 | REV REV DATE |

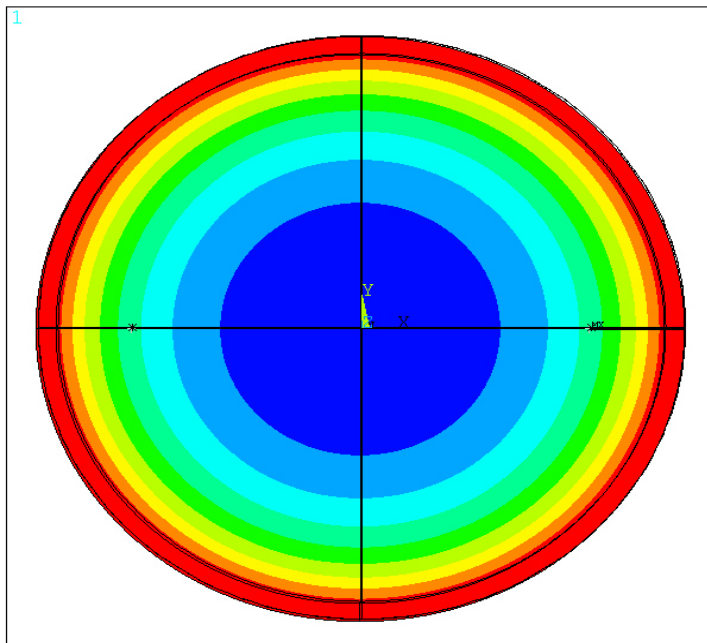
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1440
 TIME=7200
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =154.343
 SMK =1049.04
 154.343
 253.754
 353.165
 452.575
 551.986
 651.397
 750.807
 850.218
 949.629
 1049.04

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 4719 | 3067 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 4741 | 3086 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 123,3 | 179,3 | kNm |

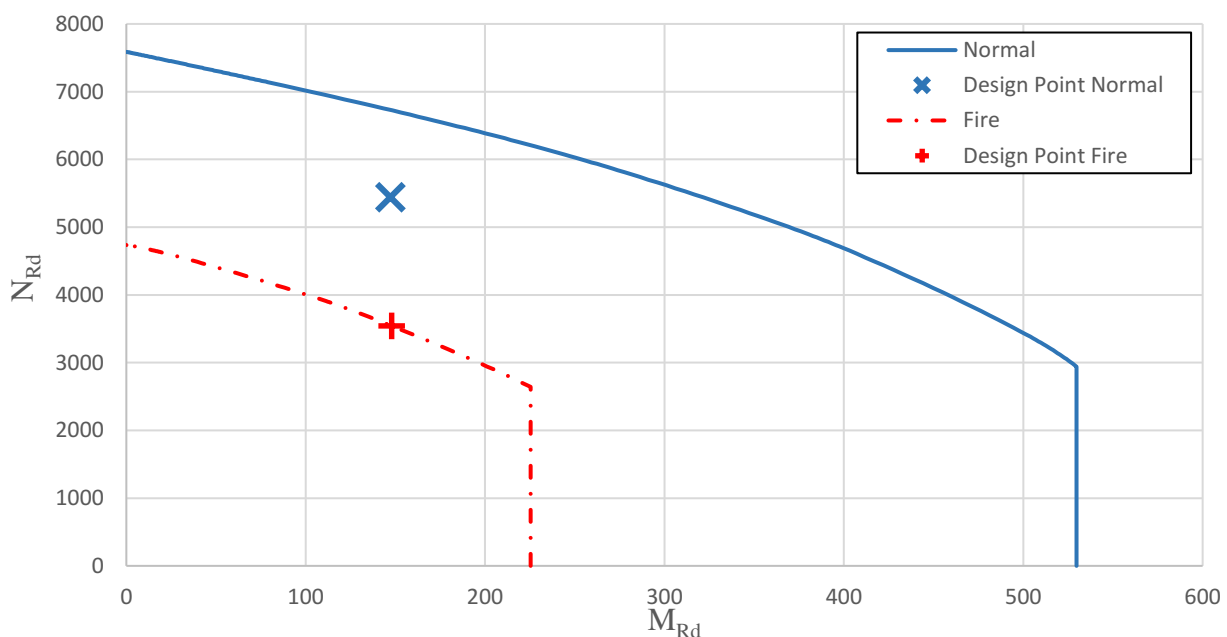



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 30 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R120 | B500B, 8T25, c =45 | REV REV DATE |

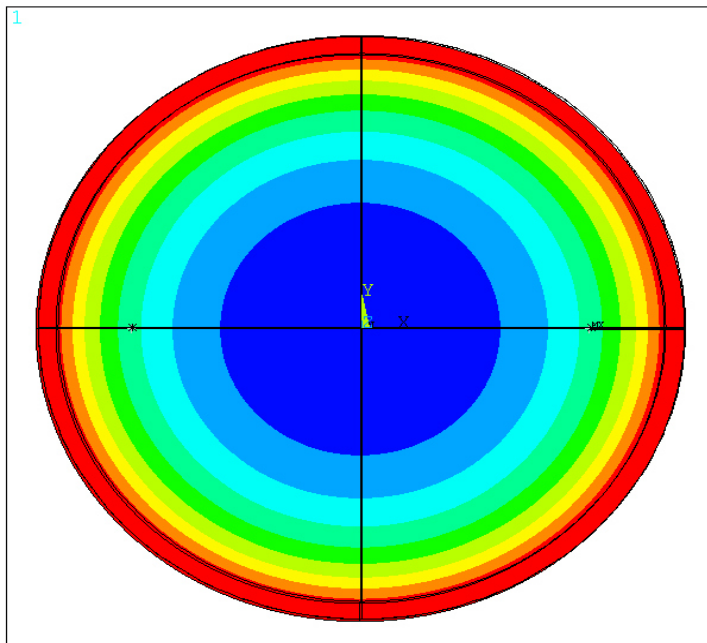
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1440
 TIME=7200
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =154.171
 SMK =1049.04
 154.171
 253.601
 353.031
 452.46
 551.89
 651.32
 750.75
 850.18
 949.61
 1049.04

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 5420 | 3523 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 5442 | 3542 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 147,1 | 147,9 | kNm |

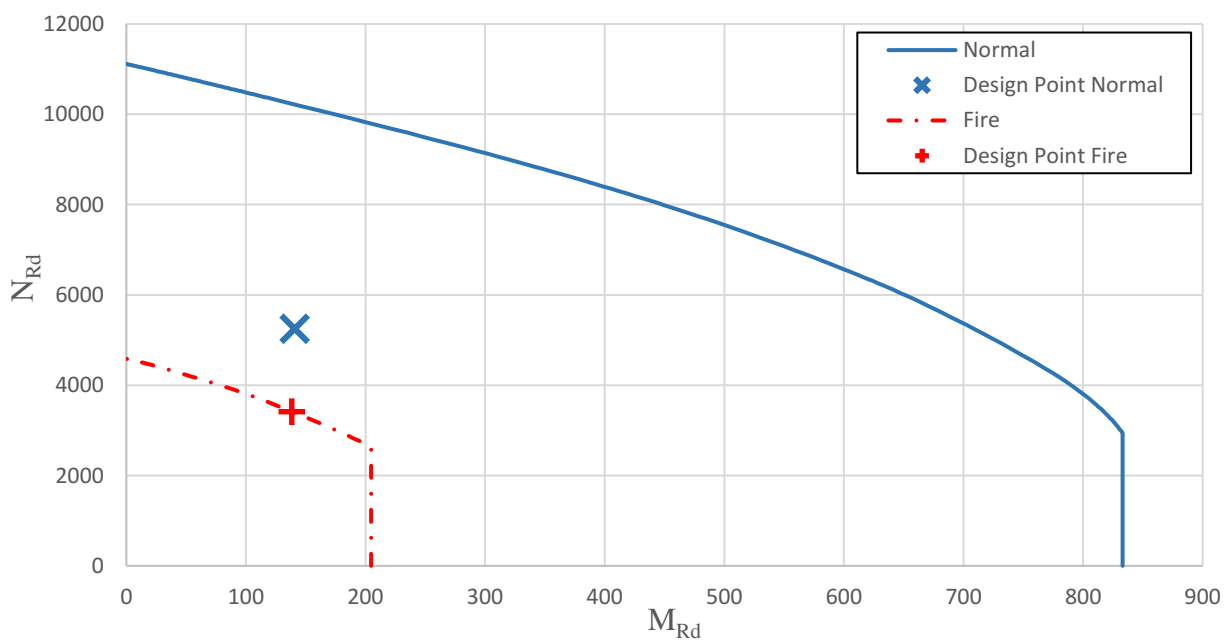



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 31 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R120 | B500B, 8T25, c =45 | REV REV DATE |

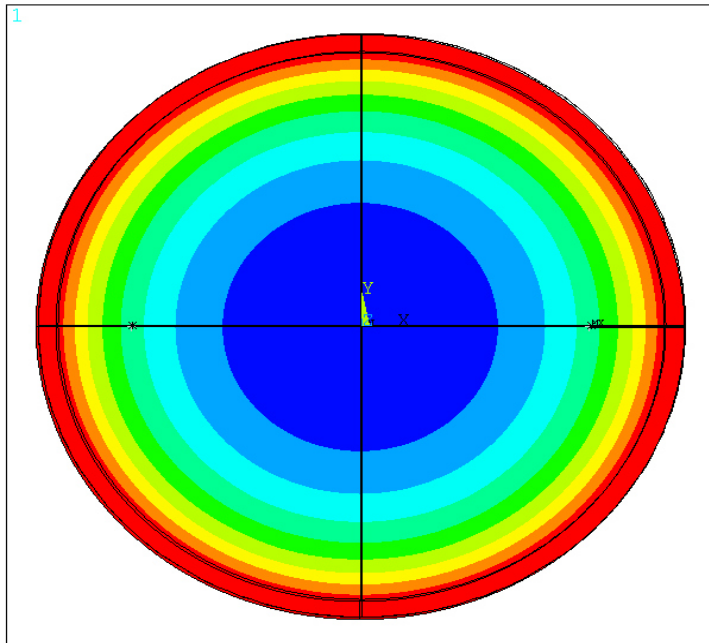
Steel**1.4462**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1440
 TIME=7200
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =154.171
 SMK =1049.04
 154.171
 253.601
 353.031
 452.46
 551.89
 651.32
 750.75
 850.18
 949.61
 1049.04

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 5225 | 3396 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 5247 | 3415 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 140,8 | 138,4 | kNm |

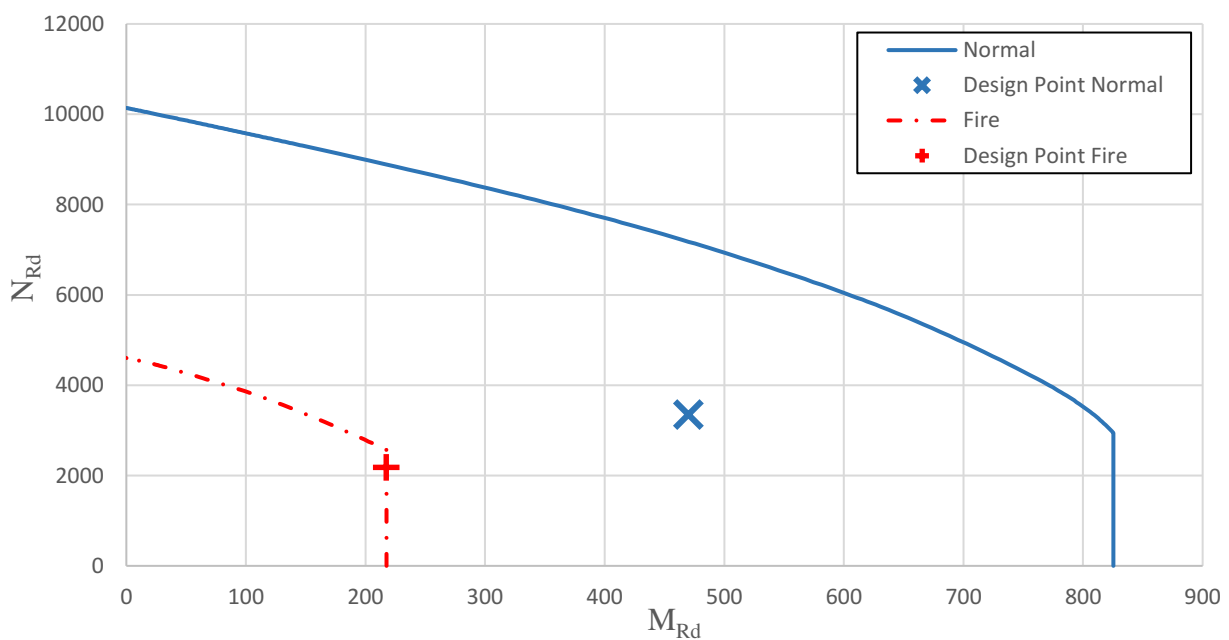



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 32 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R120 | B500B, 8T25, c =45 | REV REV DATE |

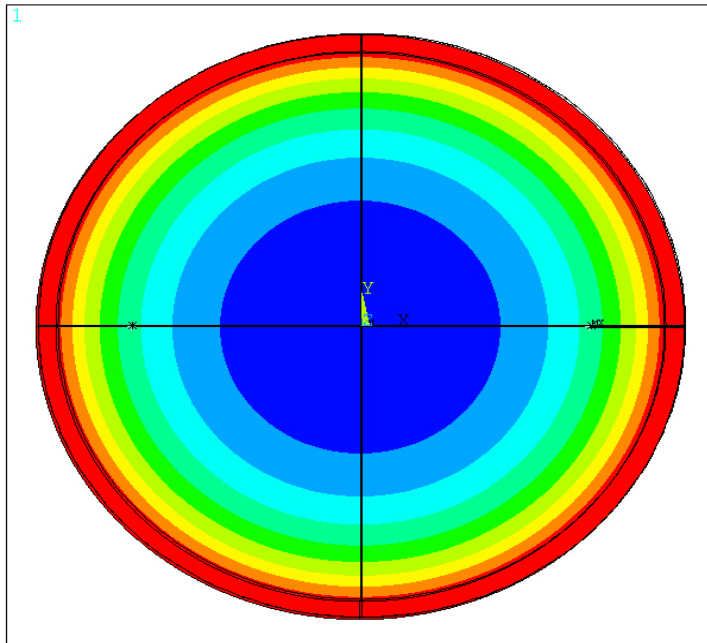
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
PLOT NO. 1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1440
TIME=7200
/EXPANDED
TEMP (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=4
AVRES=Mat
SMN =162.506
SMX =1049.04
162.506
261.009
359.513
458.017
556.521
655.025
753.528
852.032
950.536
1049.04

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3331 | 2165 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -469,9 | -58,6 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 235,0 | 29,3 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3353 | 2184 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 469,9 | 217,4 | kNm |

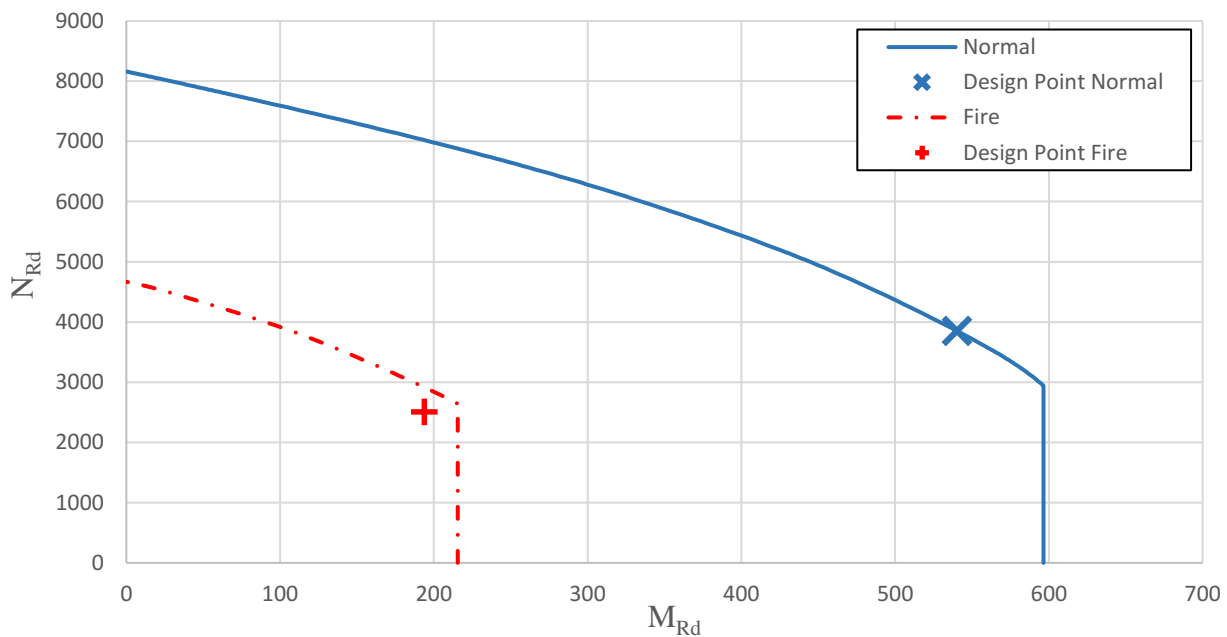



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 33 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R120 | B500B, 8T25, c =45 | REV REV DATE |

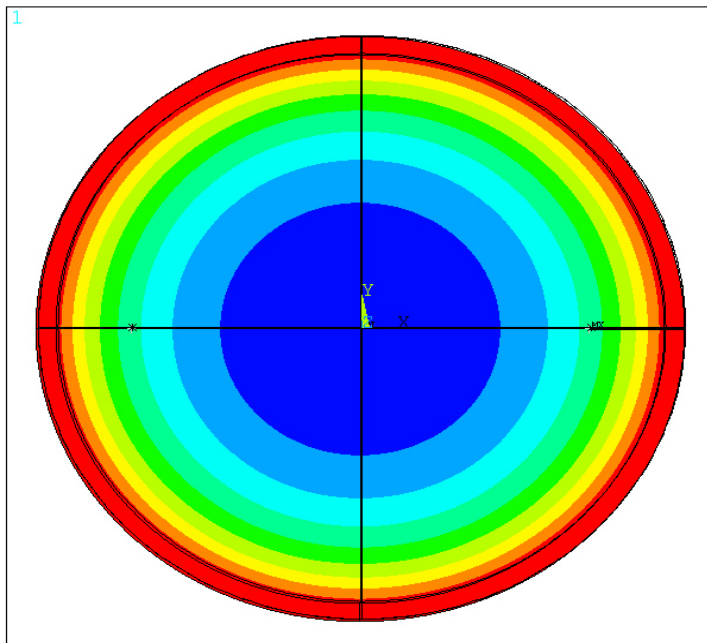
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1440
 TIME=7200
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =154.343
 SMX =1049.04
 154.343
 253.754
 353.165
 452.575
 551.986
 651.397
 750.807
 850.218
 949.629
 1049.04

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3829 | 2489 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -540,2 | -92,9 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 270,1 | 46,5 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3851 | 2508 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 540,2 | 193,8 | kNm |

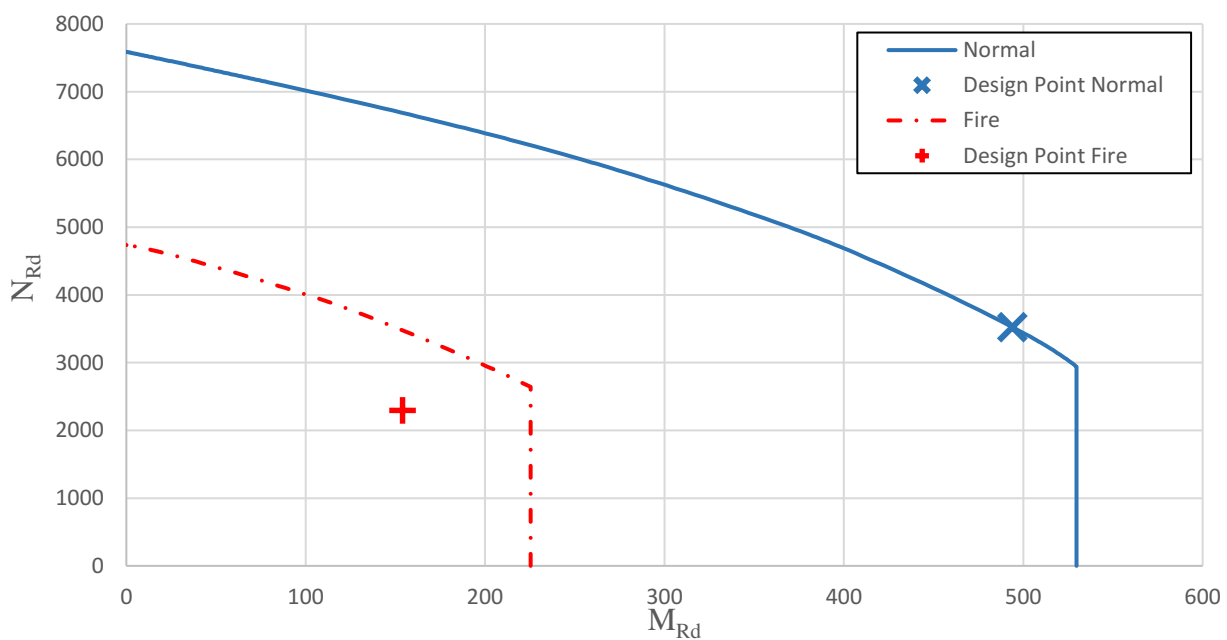



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 34 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R120 | B500B, 8T25, c =45 | REV REV DATE |

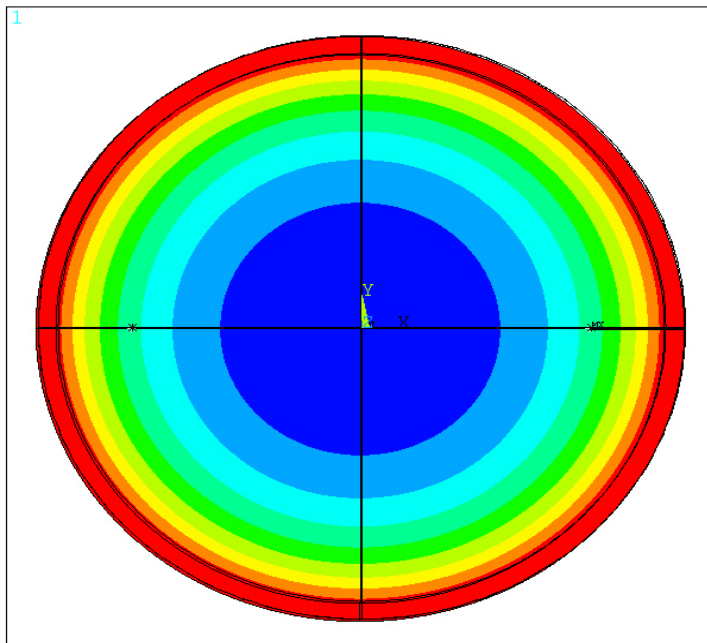
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1440
 TIME=7200
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =154.171
 SMK =1049.04
 154.171
 253.601
 353.031
 452.46
 551.89
 651.32
 750.75
 850.18
 949.61
 1049.04

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3501 | 2276 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -493,9 | -128,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 247,0 | 64,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3523 | 2295 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 493,9 | 153,9 | kNm |

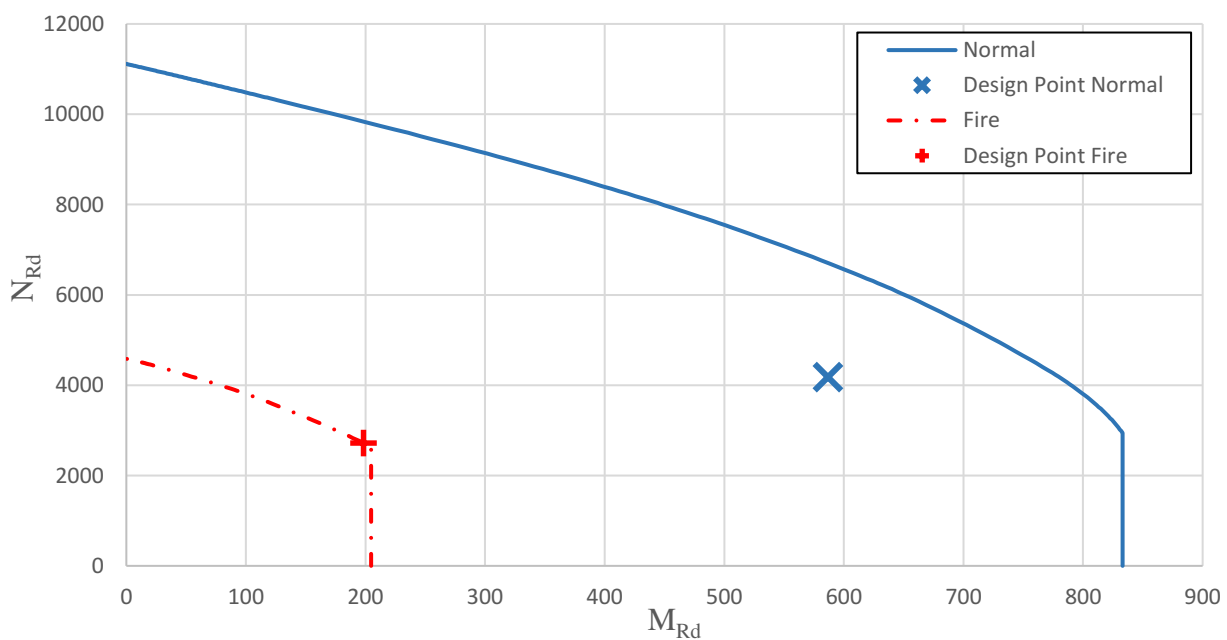



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 35 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R120 | B500B, 8T25, c =45 | REV DATE |

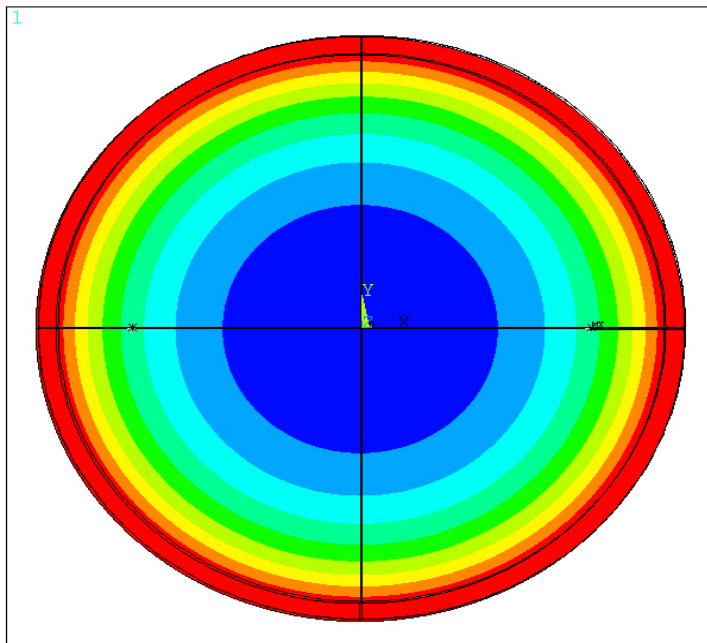
Steel**1.4462**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1440
 TIME=7200
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =154.171
 SMX =1049.04
 154.171
 253.601
 353.031
 452.46
 551.89
 651.32
 750.75
 850.18
 949.61
 1049.04

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 4158 | 2703 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d,top}$ | -586,6 | -152,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d,bot}$ | 293,3 | 76,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 4180 | 2722 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 586,6 | 198,4 | kNm |

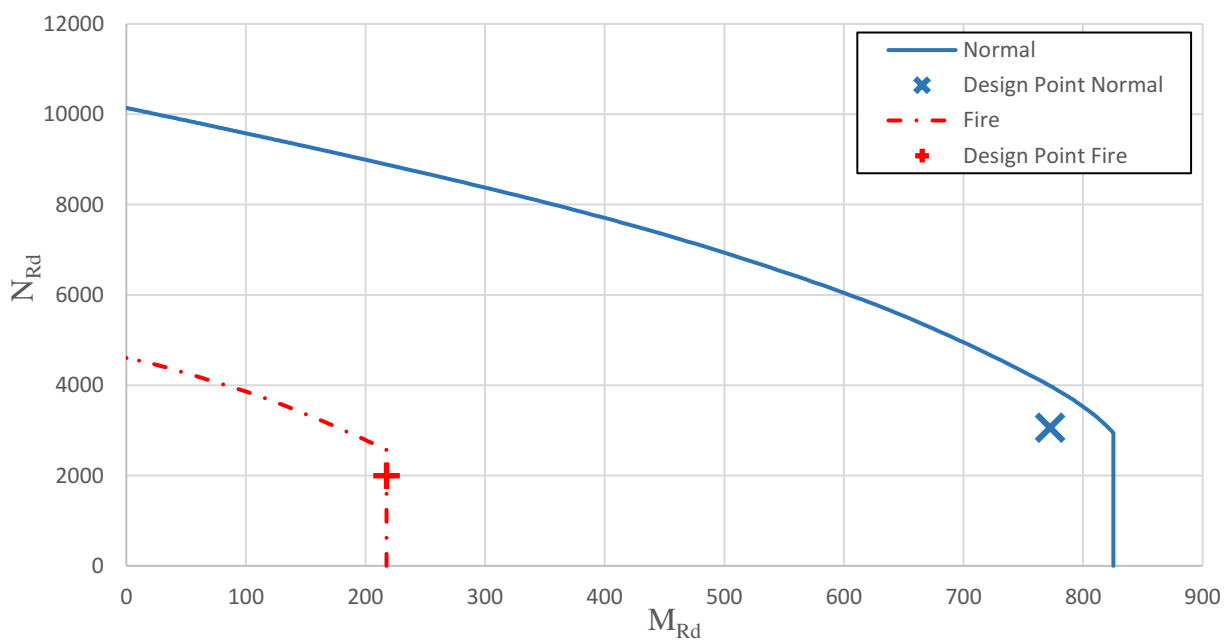



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 36 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R120 | B500B, 8T25, c =45 | REV DATE |

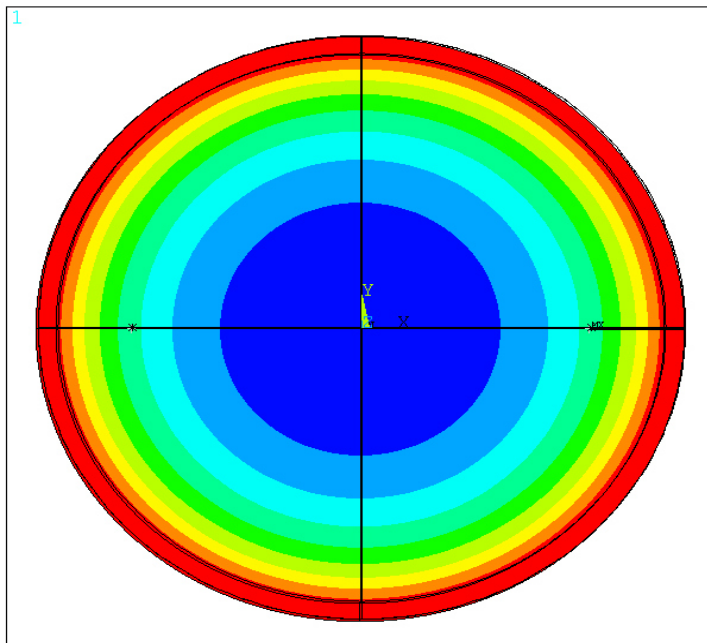
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1440
 TIME=7200
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =162.506
 SMX =1049.04
 162.506
 261.009
 359.513
 458.017
 556.521
 655.025
 753.528
 852.032
 950.536
 1049.04

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3040 | 1976 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -772,6 | -96,4 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 386,3 | 48,2 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3062 | 1995 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 772,6 | 217,5 | kNm |

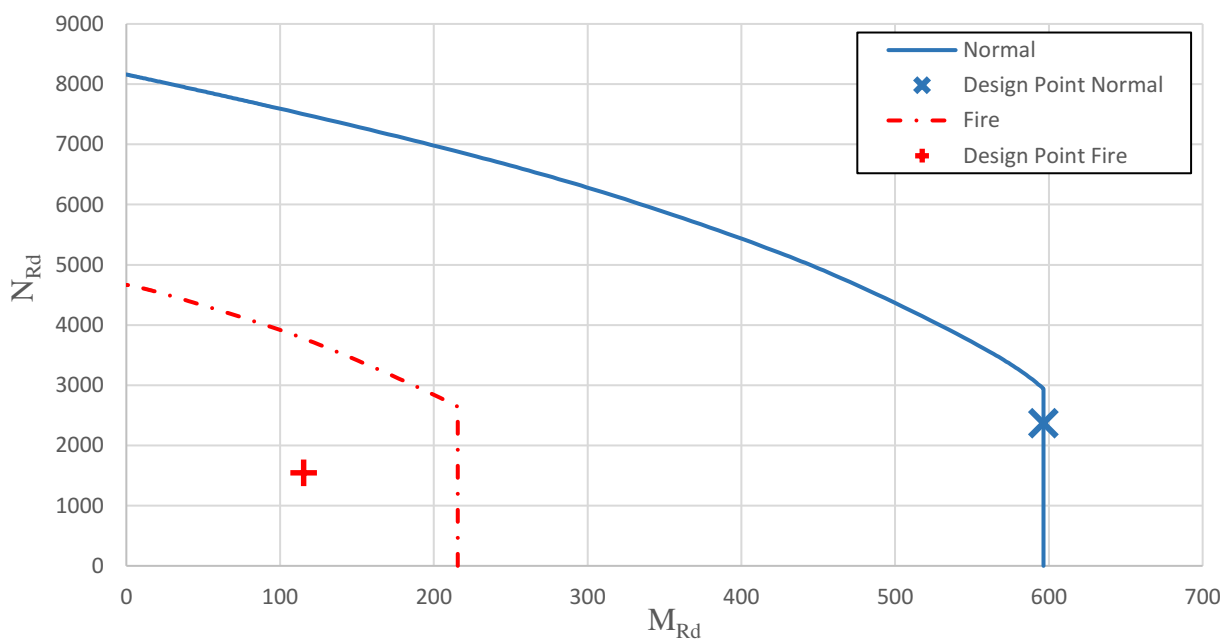



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 37 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R120 | B500B, 8T25, c =45 | REV REV DATE |

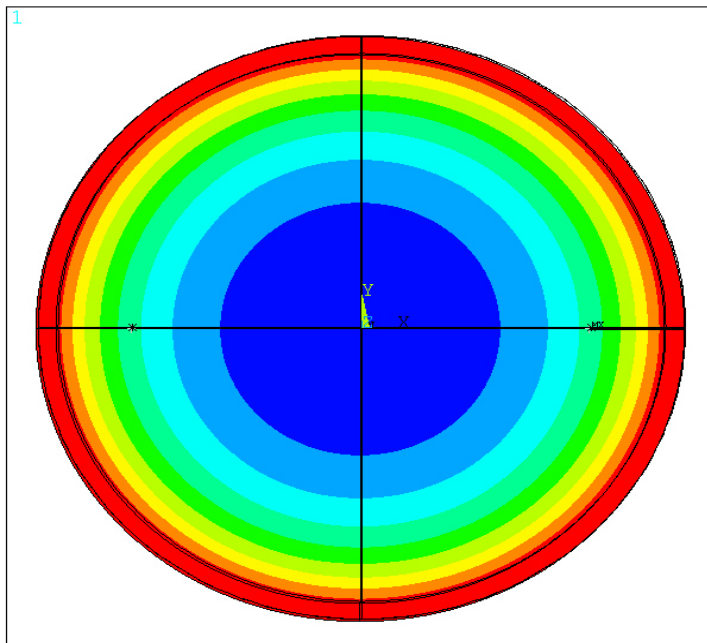
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1440
 TIME=7200
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =154.343
 SMK =1049.04
 154.343
 253.754
 353.165
 452.575
 551.986
 651.397
 750.807
 850.218
 949.629
 1049.04

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2347 | 1526 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -596,5 | -102,6 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 298,2 | 51,3 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2369 | 1545 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 596,5 | 115,2 | kNm |

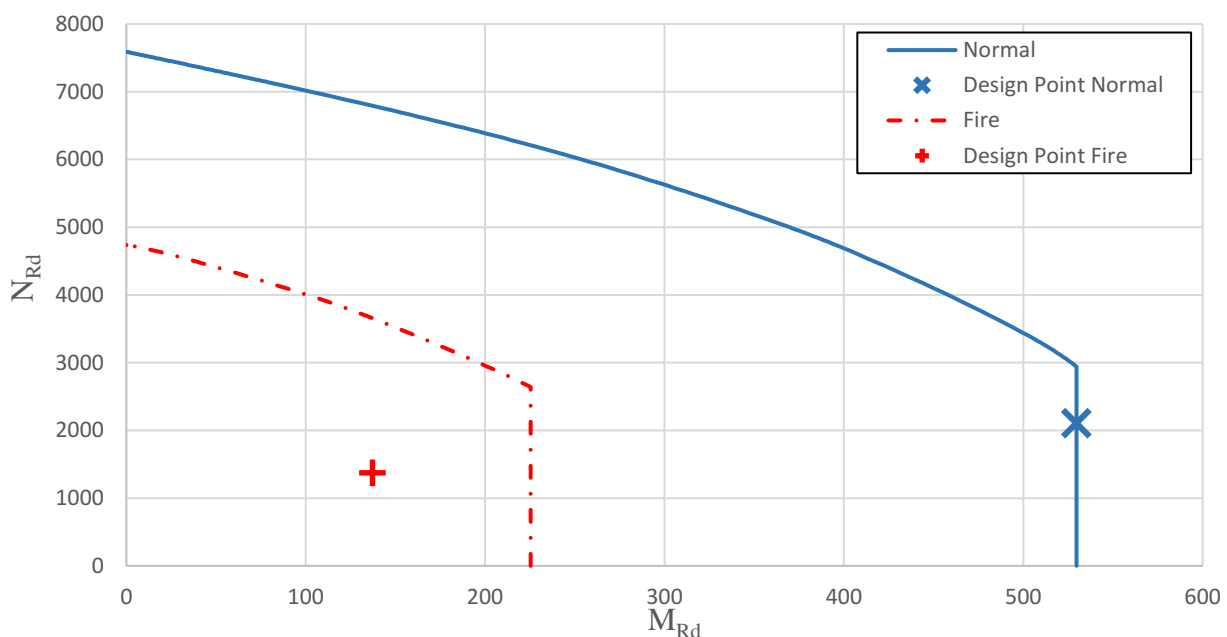



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 38 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R120 | B500B, 8T25, c =45 | REV REV DATE |

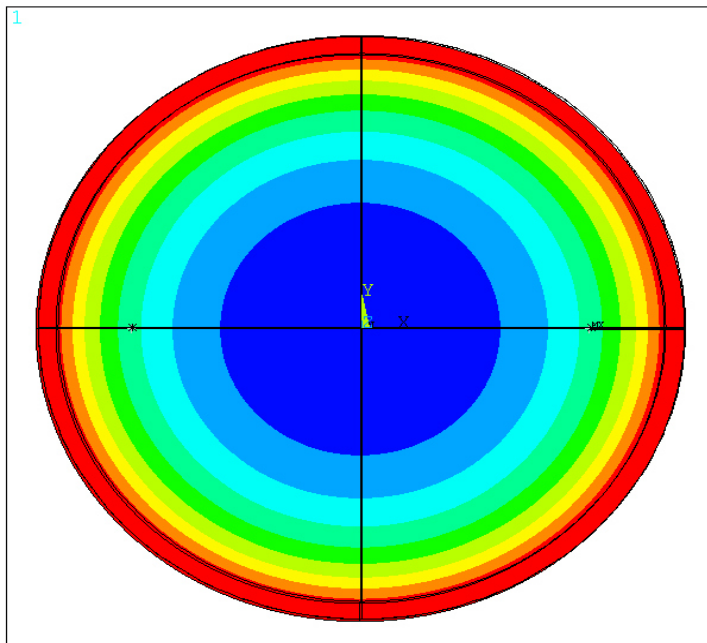
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1440
 TIME=7200
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =154.171
 SMK =1049.04
 154.171
 253.601
 353.031
 452.46
 551.89
 651.32
 750.75
 850.18
 949.61
 1049.04

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2084 | 1355 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d,top}$ | -529,6 | -137,2 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d,bot}$ | 264,8 | 68,6 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2106 | 1374 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 529,6 | 137,2 | kNm |

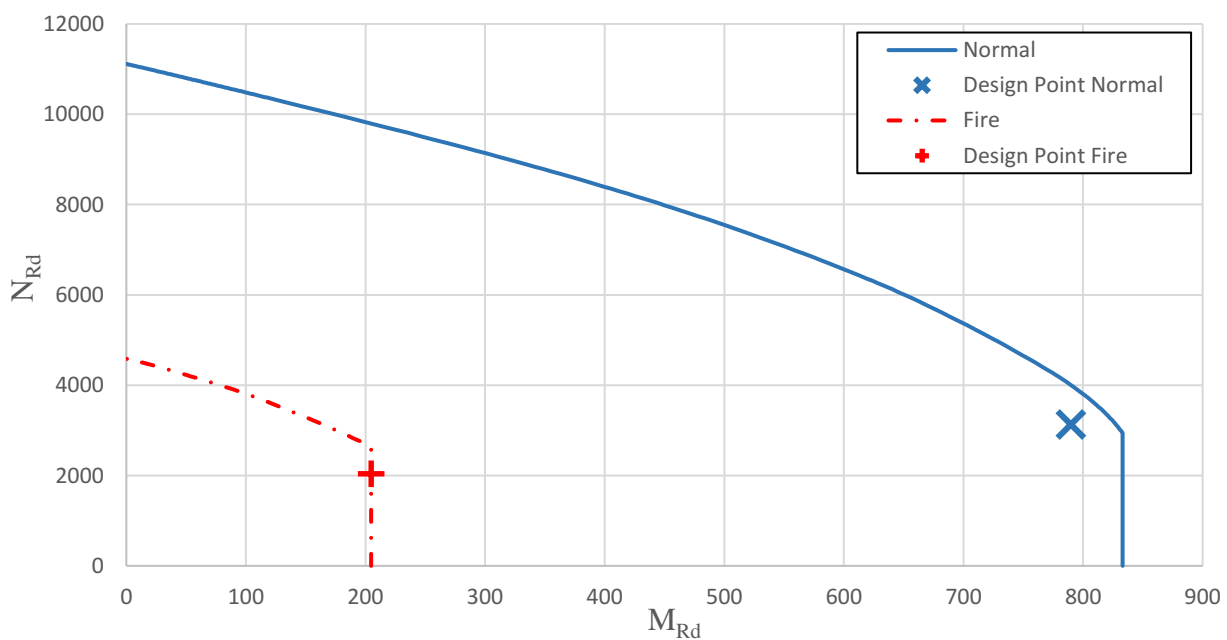



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 39 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R120 | B500B, 8T25, c =45 | REV DATE |

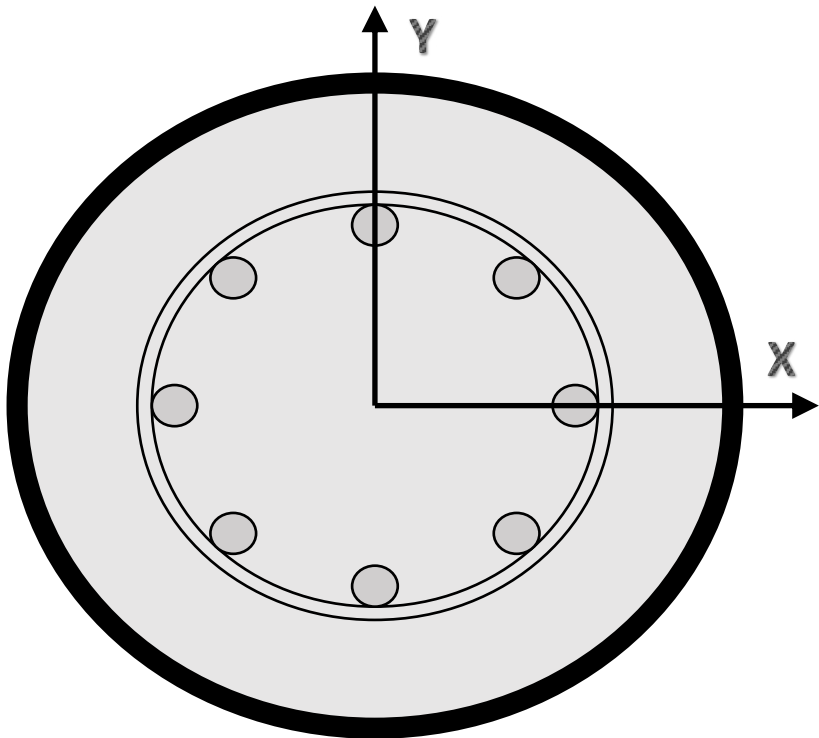
Steel**1.4462**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1440
 TIME=7200
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =154.171
 SMK =1049.04
 154.171
 253.601
 353.031
 452.46
 551.89
 651.32
 750.75
 850.18
 949.61
 1049.04

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3108 | 2020 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -789,9 | -204,6 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 394,9 | 102,3 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3130 | 2039 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 789,9 | 204,6 | kNm |




| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 40 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R180 | B500B, 8T25, c =60 | REV DATE |

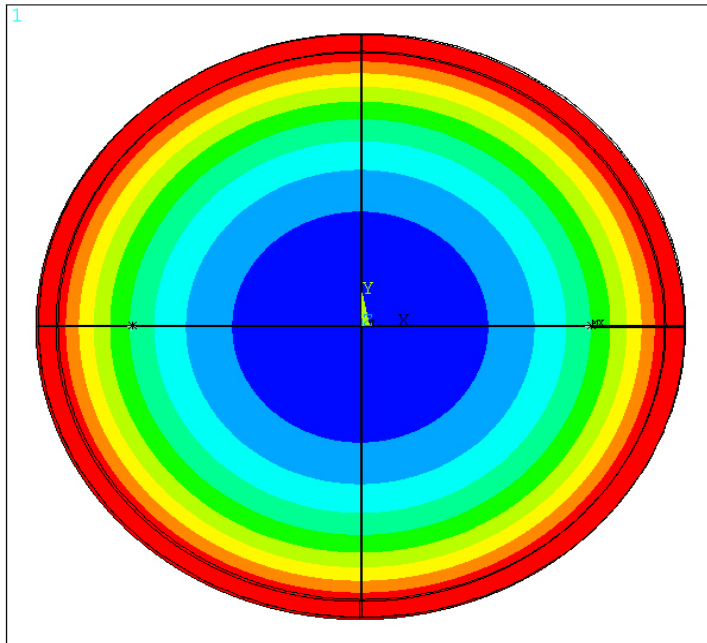


REBAR LOCATION

| | | X | | Y |
|---|---|----------|---|----------|
| | | [mm] | | [mm] |
| 1 | ± | 110,200 | ± | 0,000 |
| 2 | ± | 77,923 | ± | 77,923 |
| 3 | ± | 0,000 | ± | 110,200 |

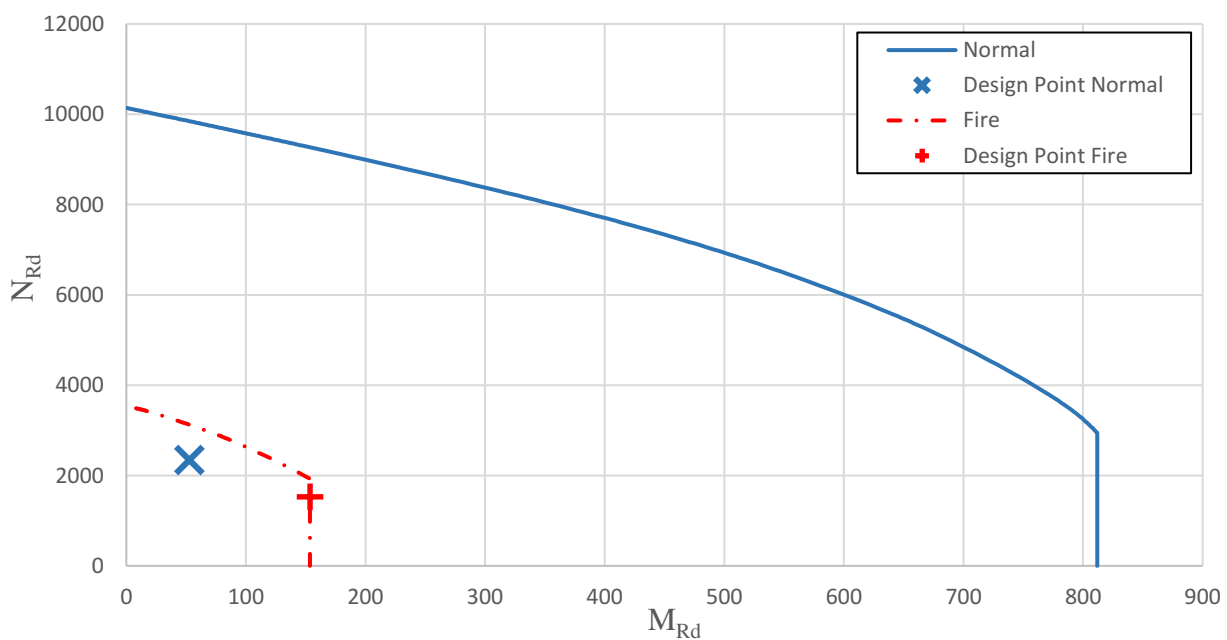
NOTE. Coordinates show positions to two or four bars.


| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 41 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R180 | B500B, 8T25, c =60 | REV REV DATE |

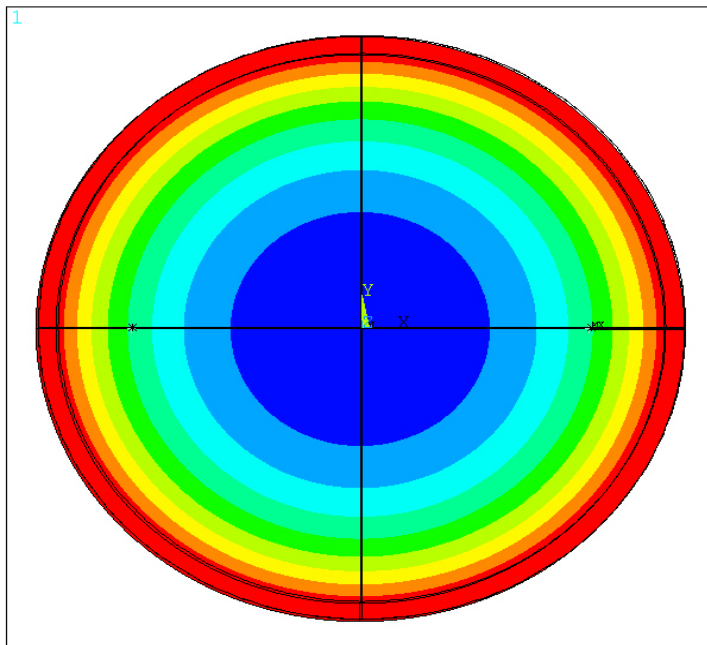
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2160
 TIME=10800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =280.724
 SMK =1109.74
 280.724
 372.837
 464.95
 557.062
 649.175
 741.288
 833.401
 925.513
 1017.63
 1109.74

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2322 | 1509 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2344 | 1528 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 52,7 | 153,5 | kNm |

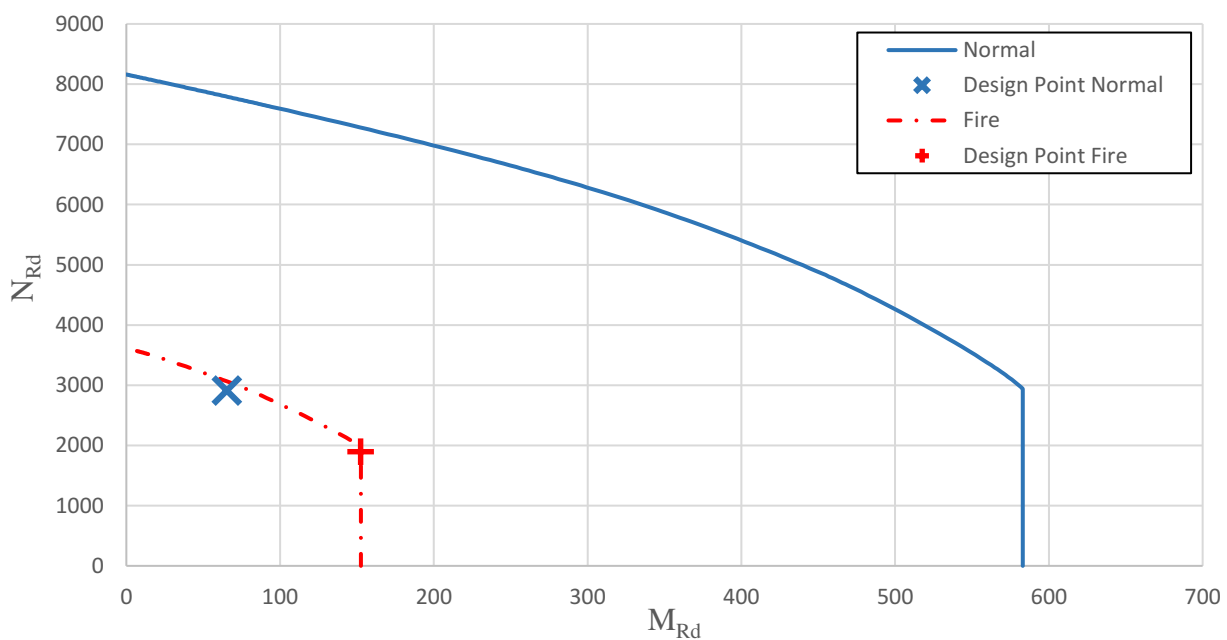



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 42 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R180 | B500B, 8T25, c =60 | REV DATE |

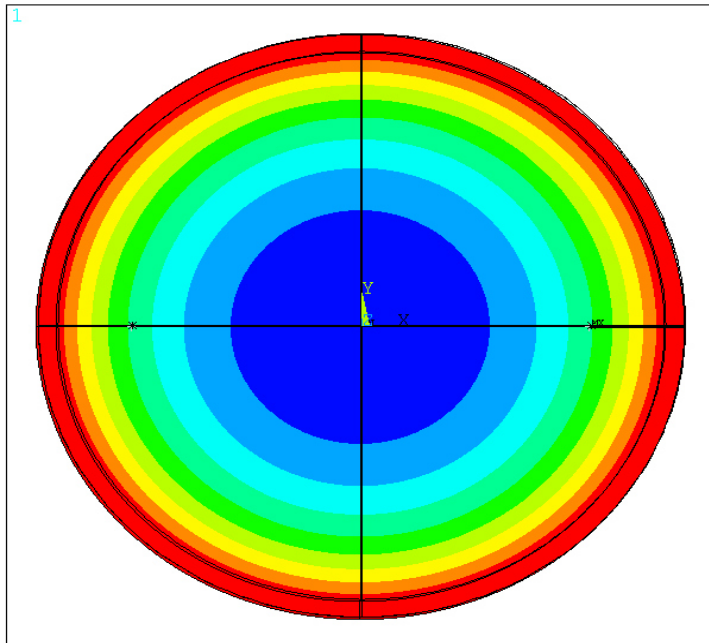
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2160
 TIME=10800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =271.663
 SMK =1109.74
 271.663
 364.783
 457.902
 551.022
 644.141
 737.261
 830.38
 923.5
 1016.62
 1109.74

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2887 | 1877 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2909 | 1896 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 65,5 | 152,4 | kNm |

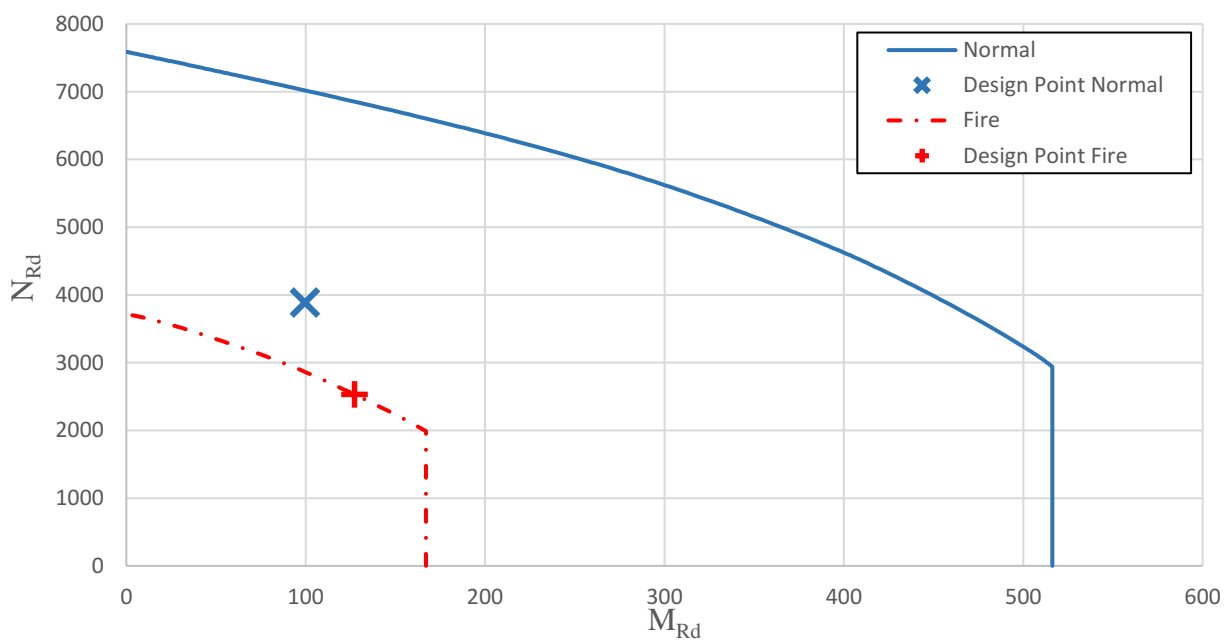



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 43 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R180 | B500B, 8T25, c =60 | REV REV DATE |

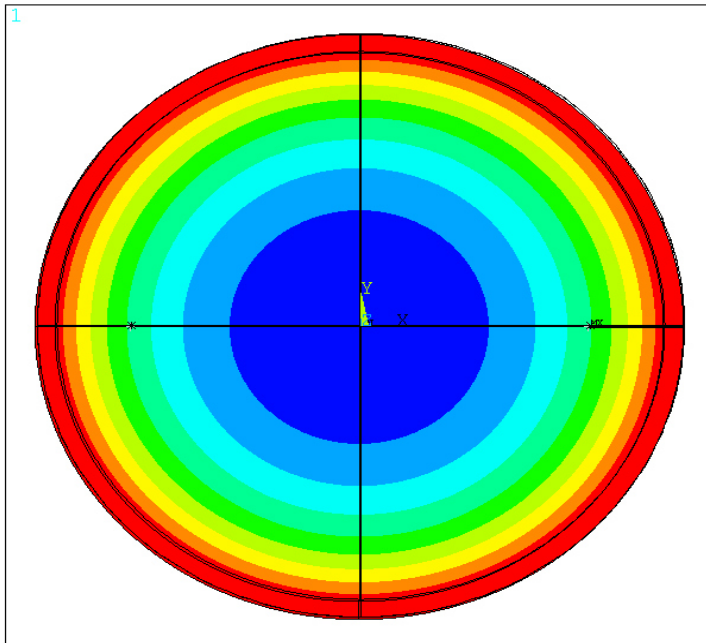
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2160
 TIME=10800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =271.719
 SMX =1109.74
 271.719
 364.833
 457.946
 551.059
 644.173
 737.286
 830.399
 923.512
 1016.63
 1109.74

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3863 | 2511 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3885 | 2530 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 99,6 | 127,2 | kNm |

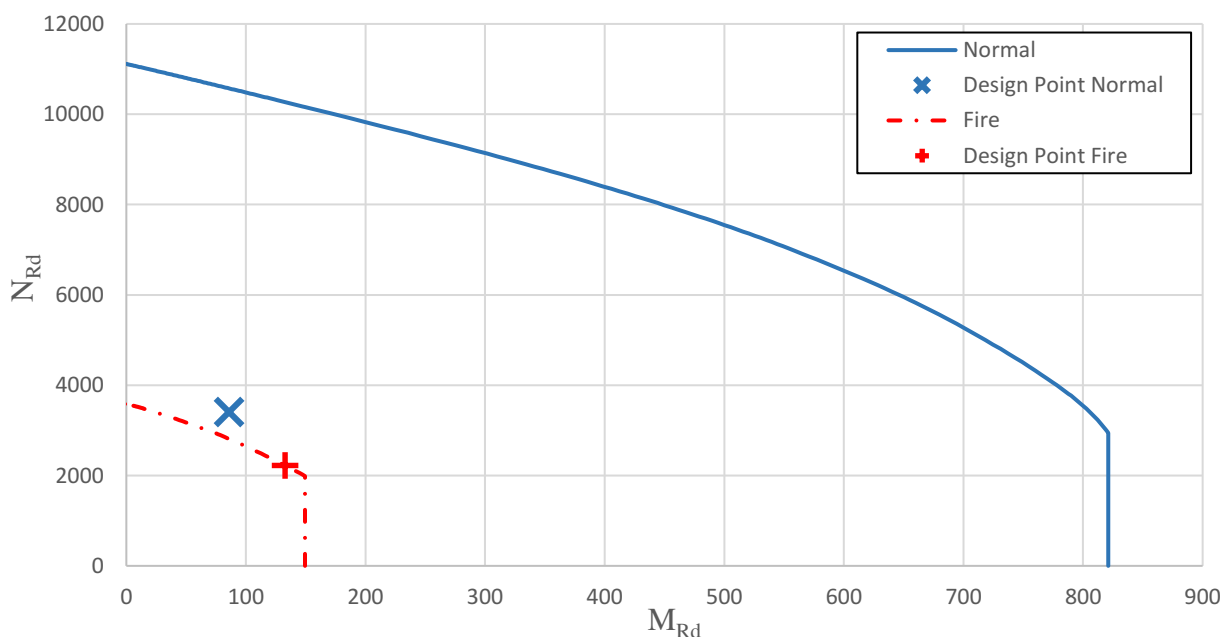



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 44 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R180 | B500B, 8T25, c =60 | REV DATE |

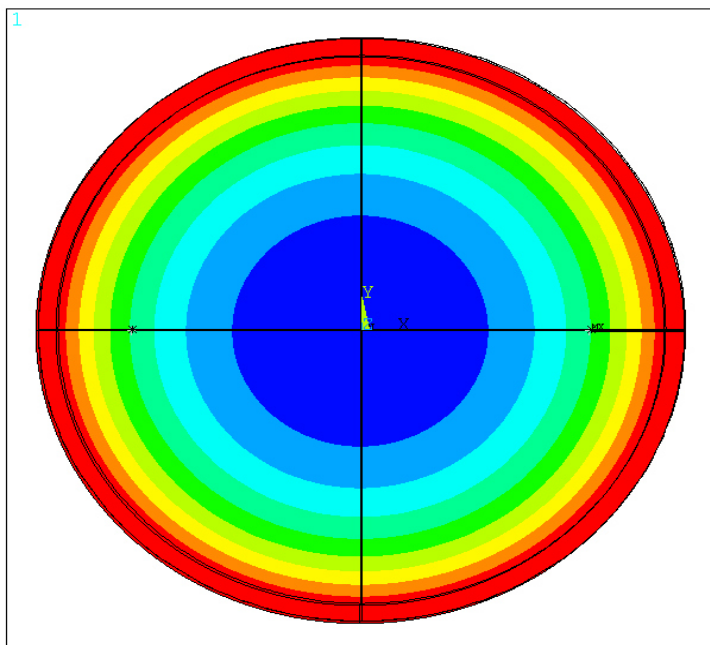
Steel**1.4462**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2160
 TIME=10800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =271.719
 SMK =1109.74
 271.719
 364.833
 457.946
 551.059
 644.173
 737.286
 830.399
 923.512
 1016.63
 1109.74

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3388 | 2202 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3410 | 2221 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 85,9 | 132,9 | kNm |

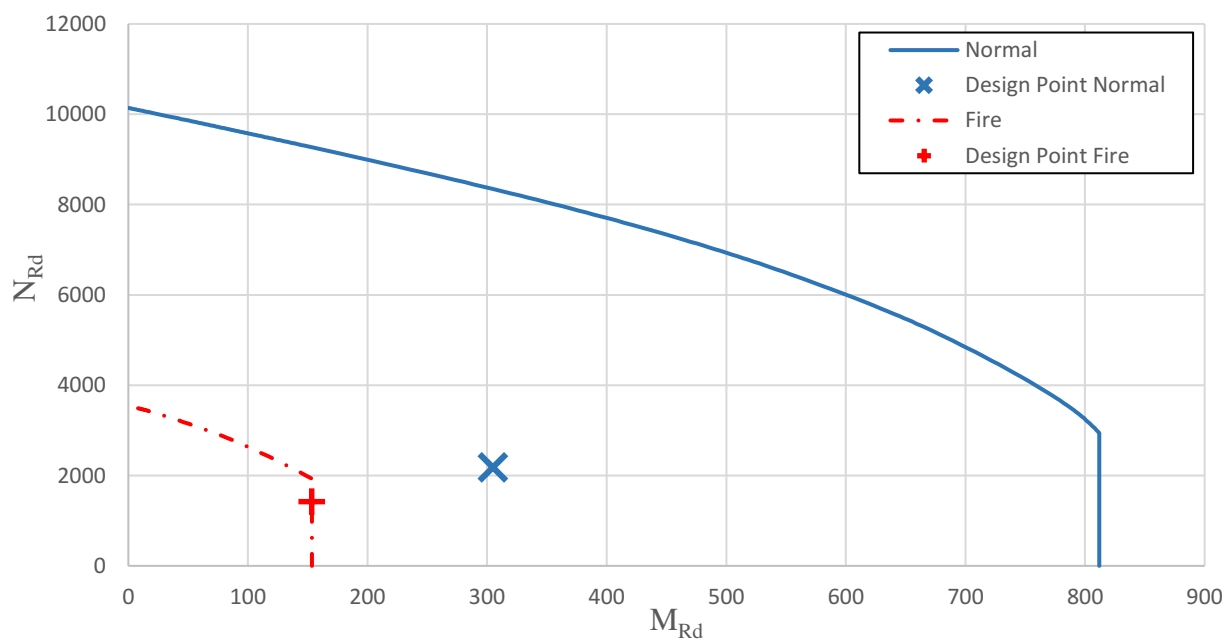



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 45 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R180 | B500B, 8T25, c =60 | REV REV DATE |

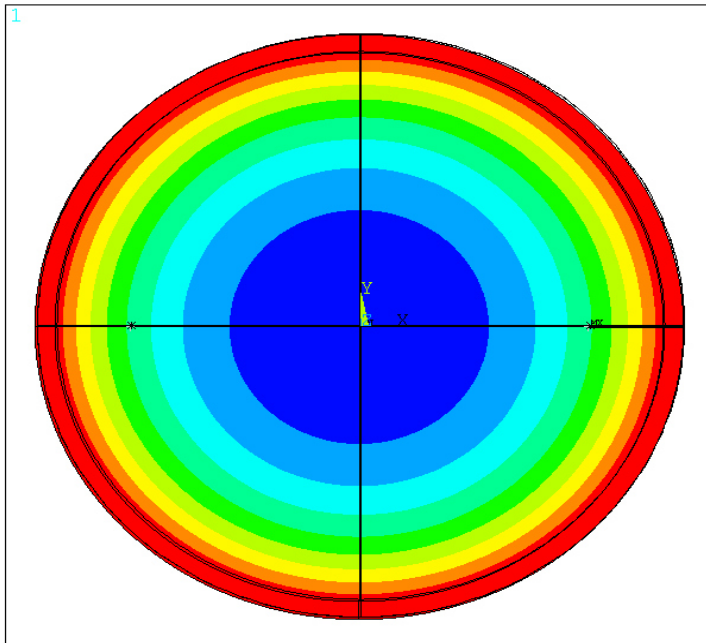
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
PLOT NO. 1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =2160
TIME=10800
/EXPANDED
TEMP (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=4
AVRES=Mat
SMN =280.724
SMX =1109.74
280.724
372.837
464.95
557.062
649.175
741.288
833.401
925.513
1017.63
1109.74

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2161 | 1405 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d,top}$ | -304,9 | -23,9 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d,bot}$ | 152,4 | 11,9 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2183 | 1424 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 304,9 | 153,5 | kNm |

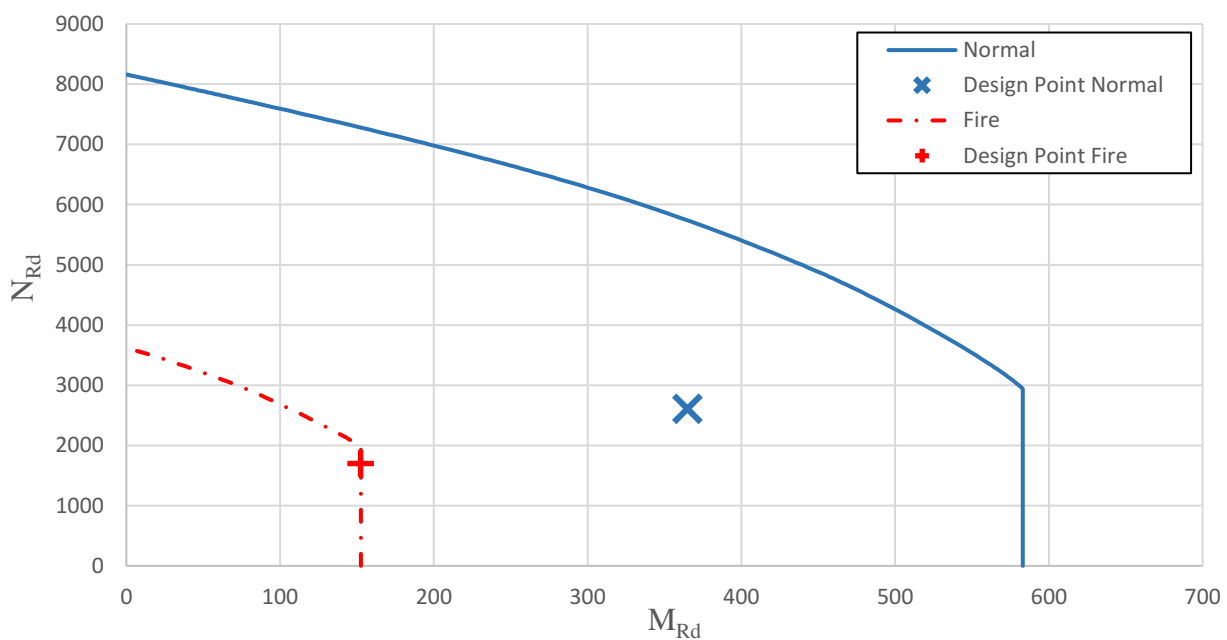



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 46 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R180 | B500B, 8T25, c =60 | REV DATE |

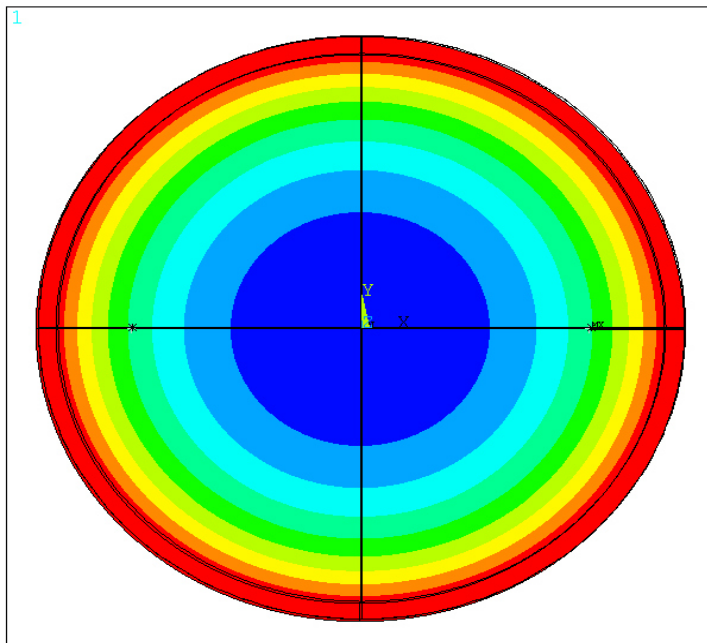
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2160
 TIME=10800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =271.663
 SMK =1109.74
 271.663
 364.783
 457.902
 551.022
 644.141
 737.261
 830.38
 923.5
 1016.62
 1109.74

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2587 | 1682 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -365,0 | -35,7 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 182,5 | 17,8 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2609 | 1701 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 365,0 | 152,5 | kNm |

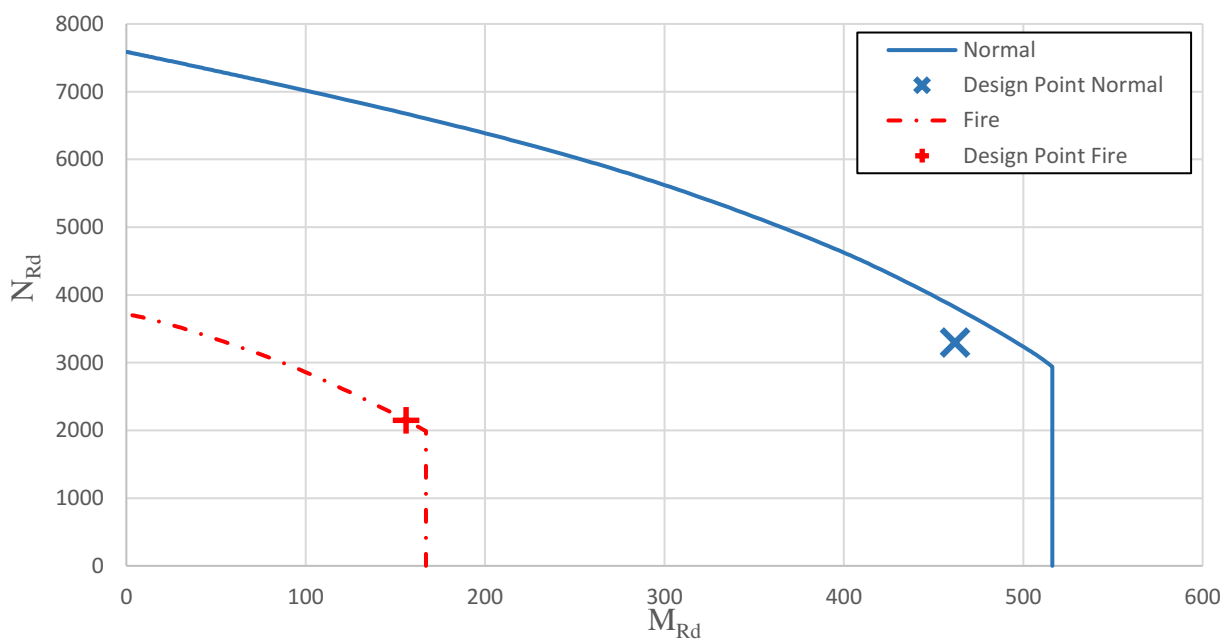



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 47 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R180 | B500B, 8T25, c =60 | REV DATE |

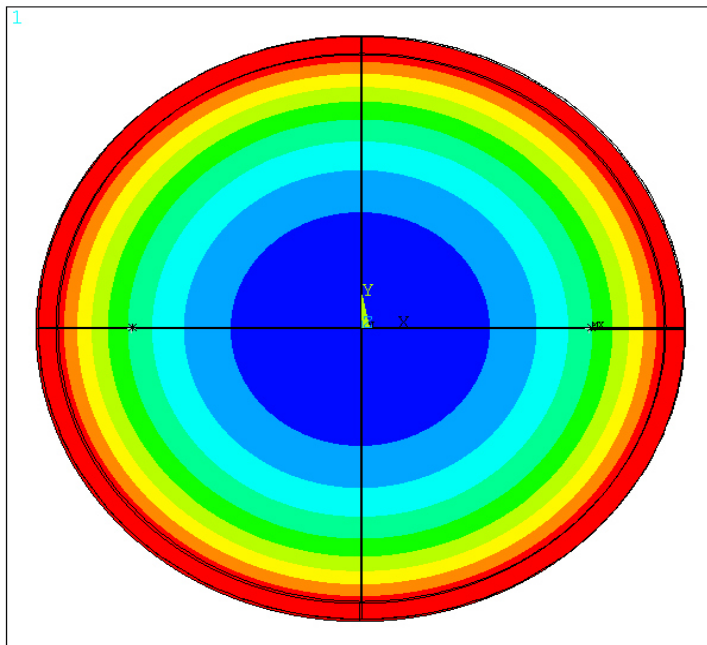
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2160
 TIME=10800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =271.719
 SMK =1109.74
 271.719
 364.833
 457.946
 551.059
 644.173
 737.286
 830.399
 923.512
 1016.63
 1109.74

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 3275 | 2129 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -462,0 | -78,5 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 231,0 | 39,2 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 3297 | 2148 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 462,0 | 156,0 | kNm |

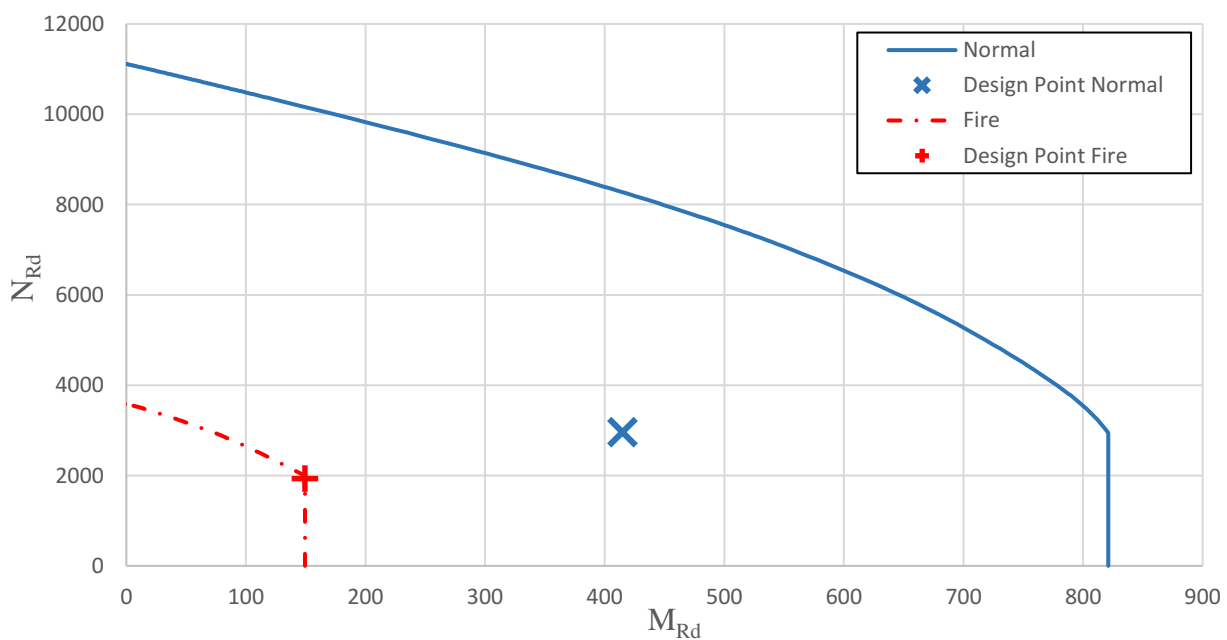



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 48 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R180 | B500B, 8T25, c =60 | REV REV DATE |

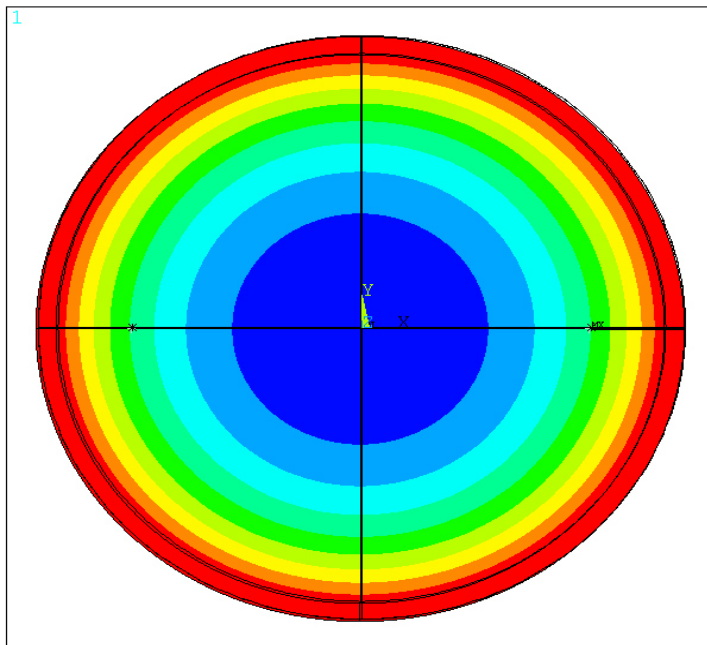
Steel**1.4462**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2160
 TIME=10800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =271.719
 SMK =1109.74
 271.719
 364.833
 457.946
 551.059
 644.173
 737.286
 830.399
 923.512
 1016.63
 1109.74

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2941 | 1912 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -414,9 | -56,7 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 207,5 | 28,3 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2963 | 1931 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 414,9 | 149,4 | kNm |

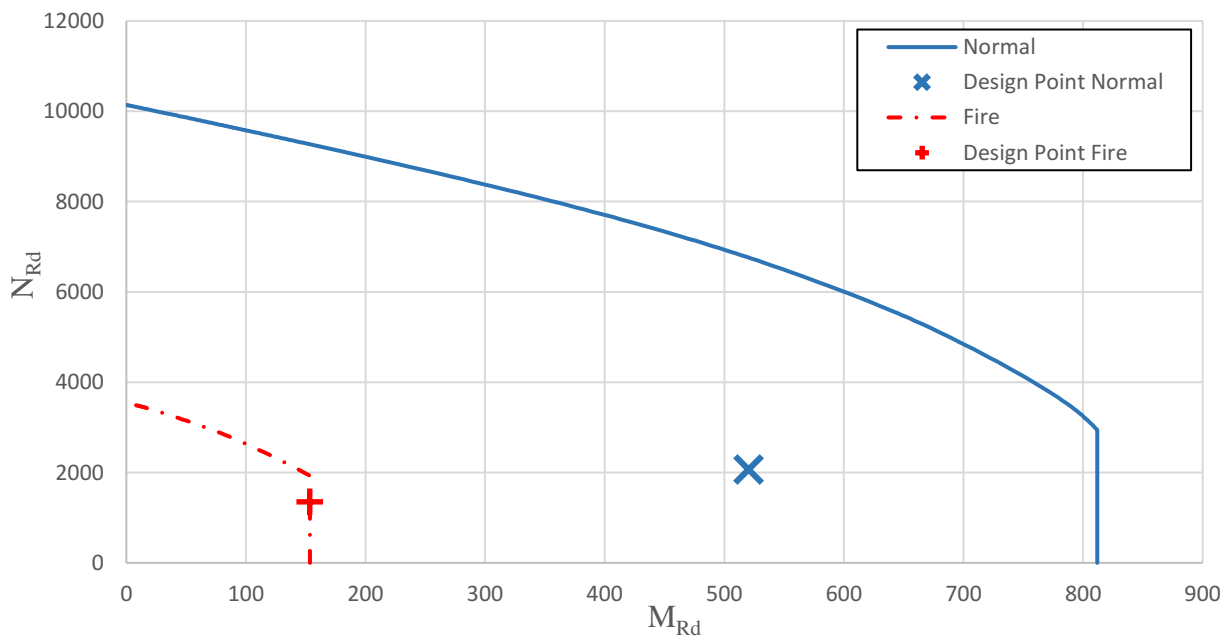



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 49 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R180 | B500B, 8T25, c =60 | REV REV DATE |

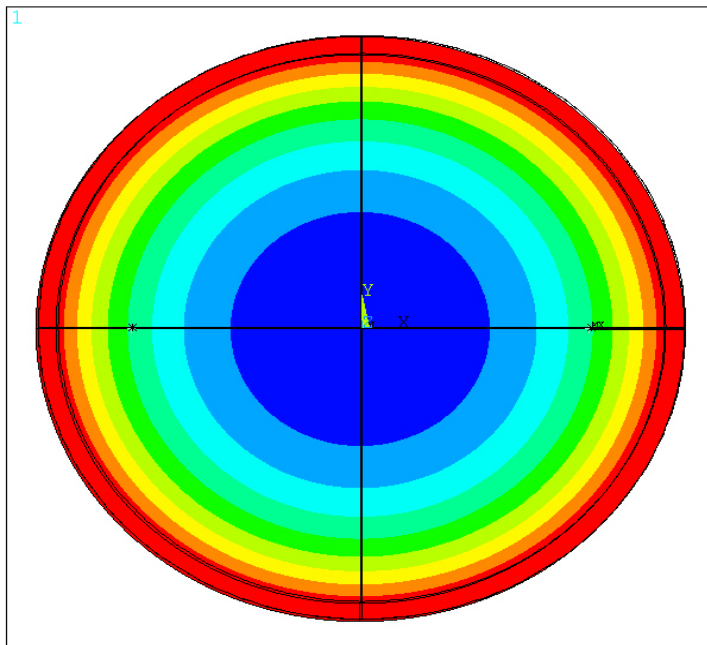
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2160
 TIME=10800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =280.724
 SMK =1109.74
 280.724
 372.837
 464.95
 557.062
 649.175
 741.288
 833.401
 925.513
 1017.63
 1109.74

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2047 | 1331 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d,top}$ | -520,2 | -40,7 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d,bot}$ | 260,1 | 20,4 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2069 | 1350 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 520,2 | 153,4 | kNm |

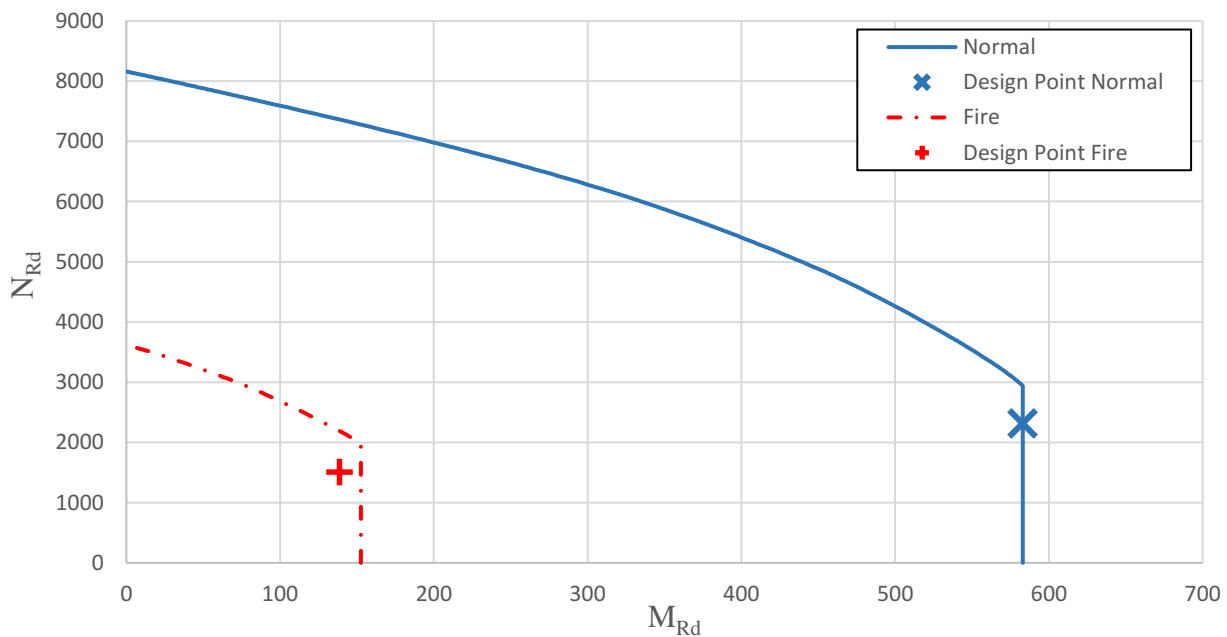



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 50 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R180 | B500B, 8T25, c =60 | REV DATE |

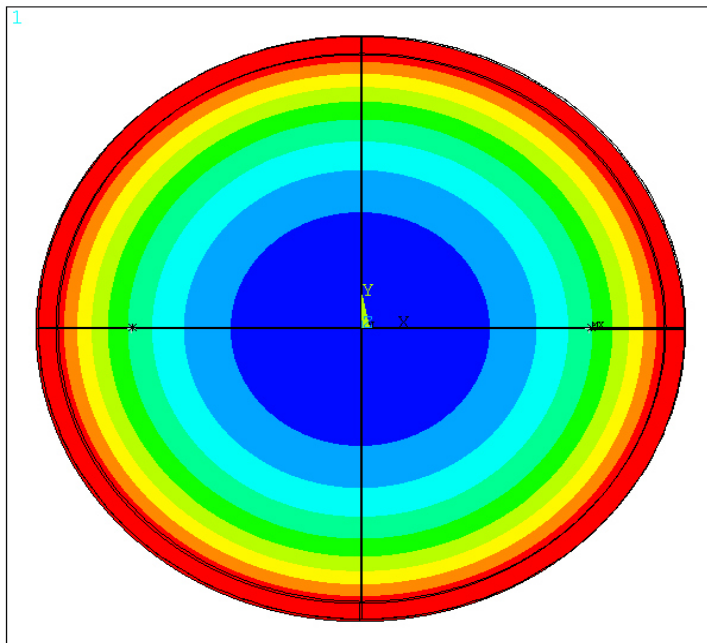
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2160
 TIME=10800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =271.663
 SMK =1109.74
 271.663
 364.783
 457.902
 551.022
 644.141
 737.261
 830.38
 923.5
 1016.62
 1109.74

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2294 | 1491 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -583,0 | -57,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 291,5 | 28,5 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2316 | 1510 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 583,0 | 138,6 | kNm |

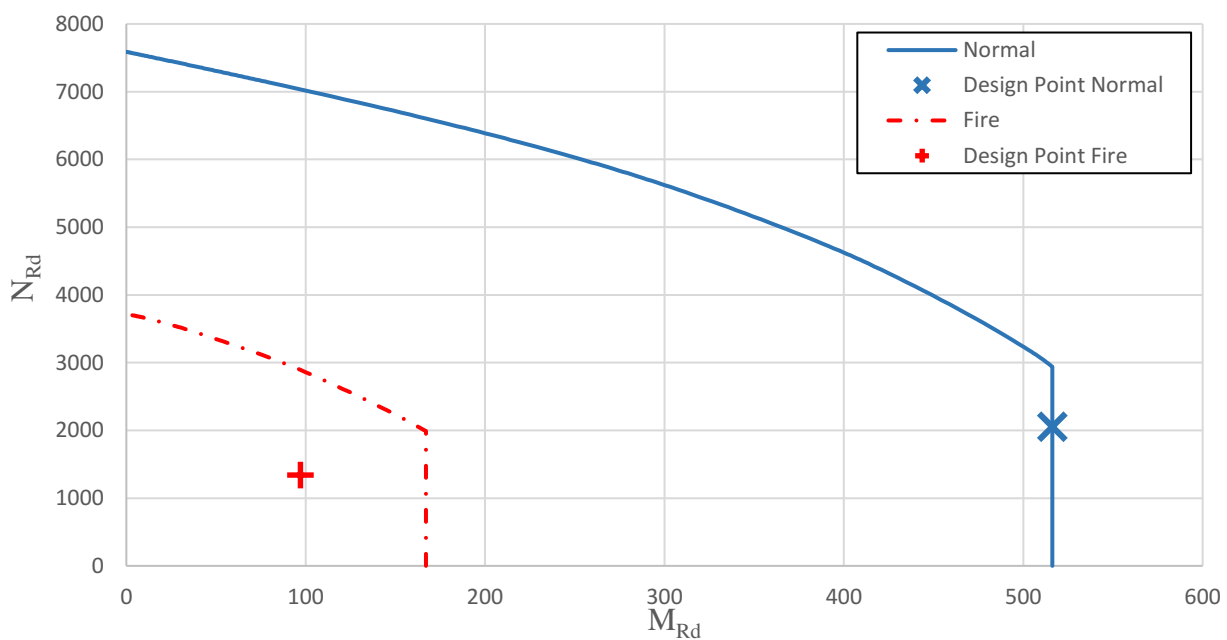



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 51 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R180 | B500B, 8T25, c =60 | REV DATE |

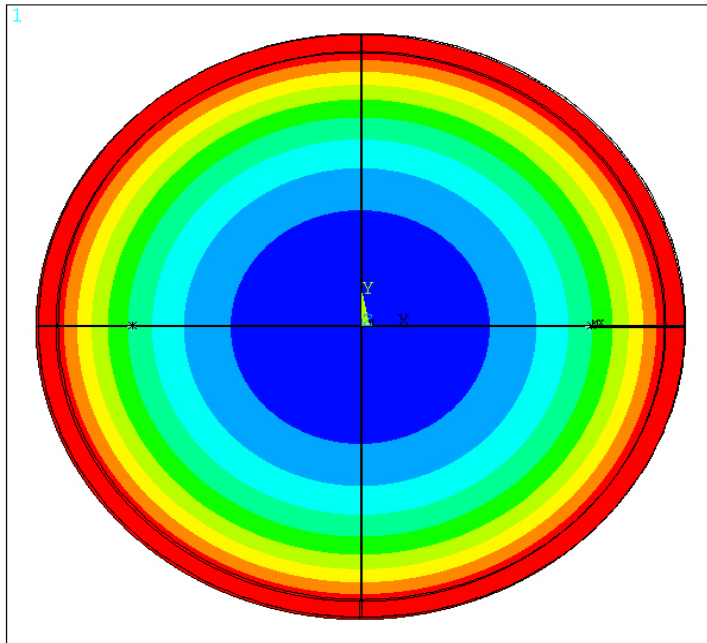
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2160
 TIME=10800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =271.719
 SMK =1109.74
 271.719
 364.833
 457.946
 551.059
 644.173
 737.286
 830.399
 923.512
 1016.63
 1109.74

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2031 | 1320 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -516,1 | -87,6 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 258,1 | 43,8 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2053 | 1339 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 516,1 | 97,1 | kNm |

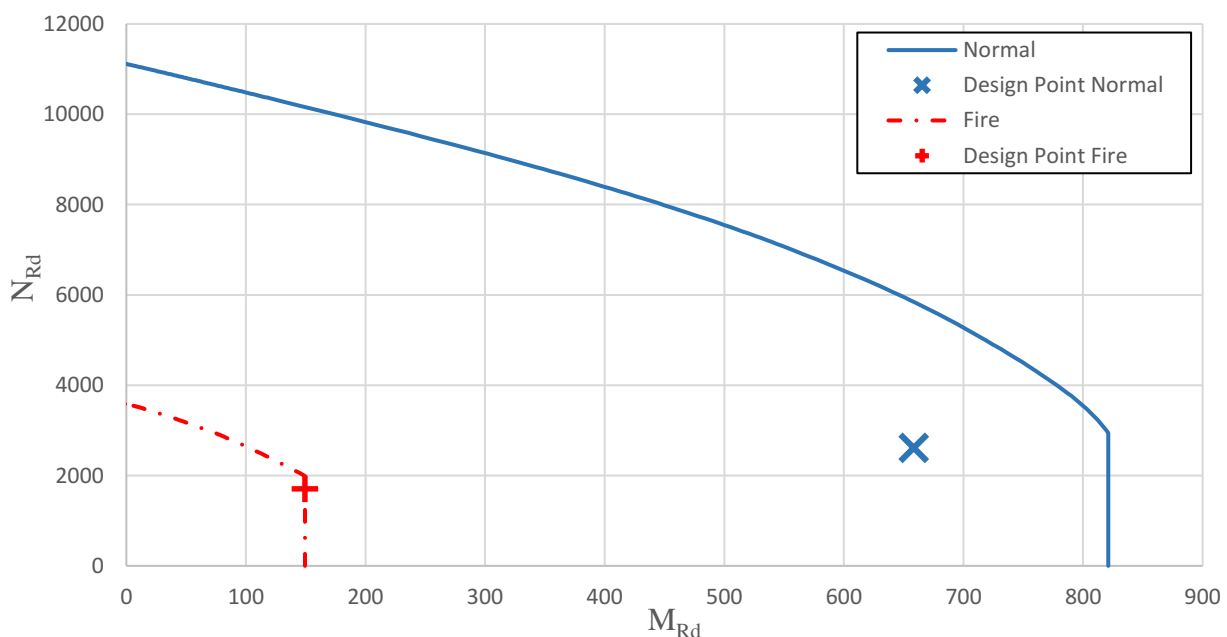



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 52 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R180 | B500B, 8T25, c =60 | REV DATE |

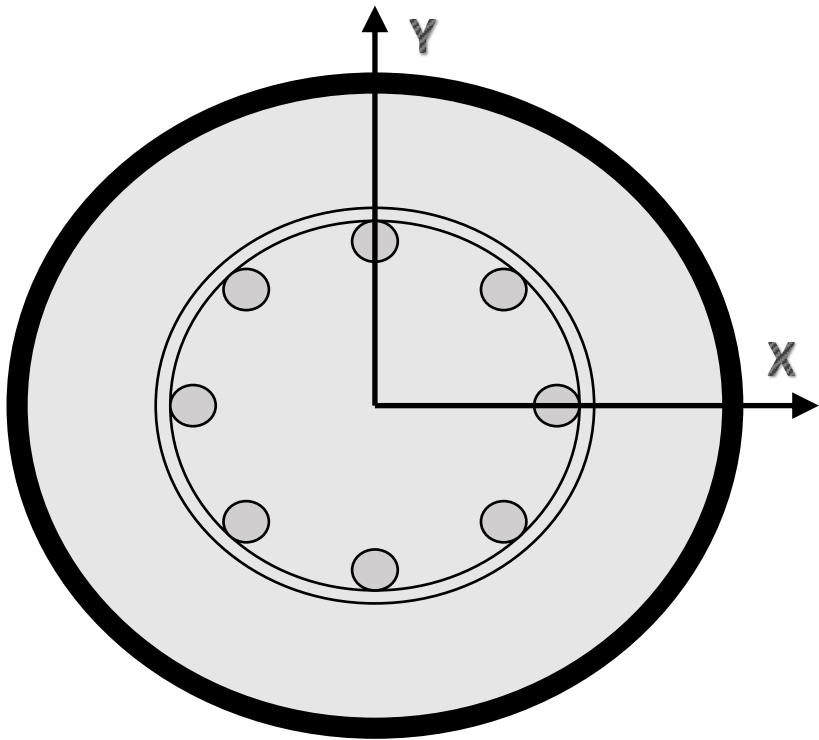
Steel**1.4462**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2160
 TIME=10800
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =271.719
 SMK =1109.74
 271.719
 364.833
 457.946
 551.059
 644.173
 737.286
 830.399
 923.512
 1016.63
 1109.74

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2591 | 1684 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -658,5 | -90,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 329,2 | 45,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2613 | 1703 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 658,5 | 149,4 | kNm |




| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 53 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R240 | B500B, 8T25, c =70 | REV DATE |

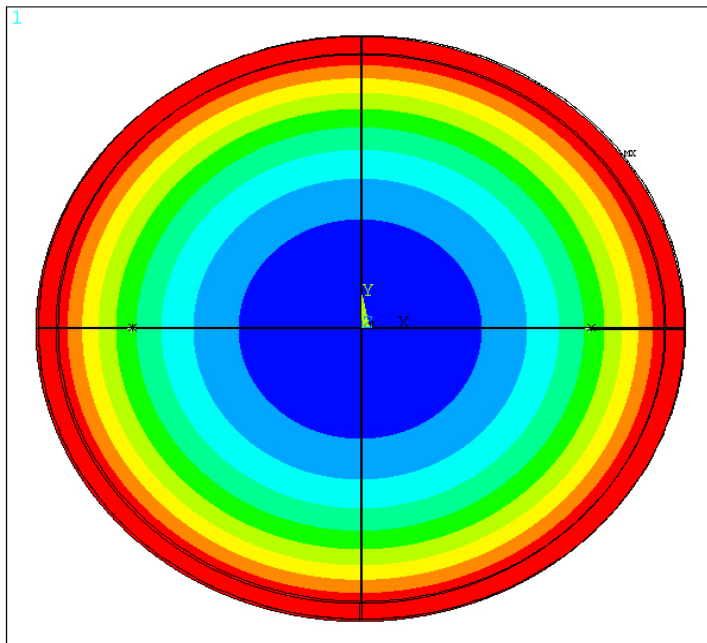


REBAR LOCATION

| | | X | | Y |
|---|---|----------|---|----------|
| | | [mm] | | [mm] |
| 1 | ± | 100,200 | ± | 0,000 |
| 2 | ± | 70,852 | ± | 70,852 |
| 3 | ± | 0,000 | ± | 100,200 |

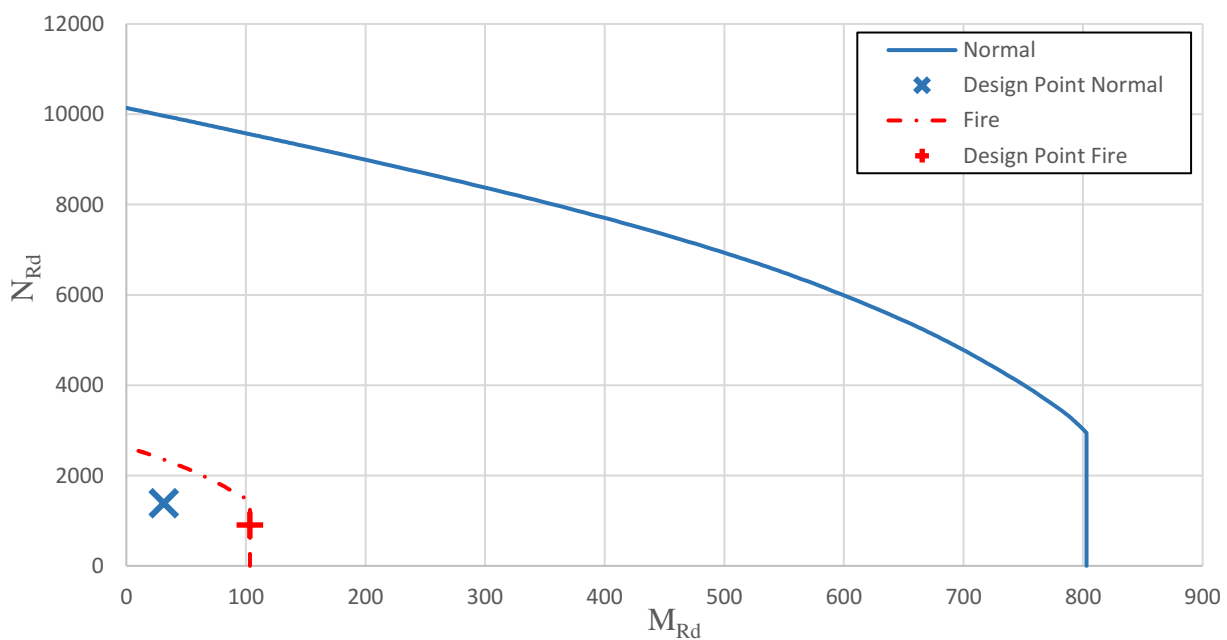
NOTE. Coordinates show positions to two or four bars.


| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 54 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R240 | B500B, 8T25, c =70 | REV REV DATE |

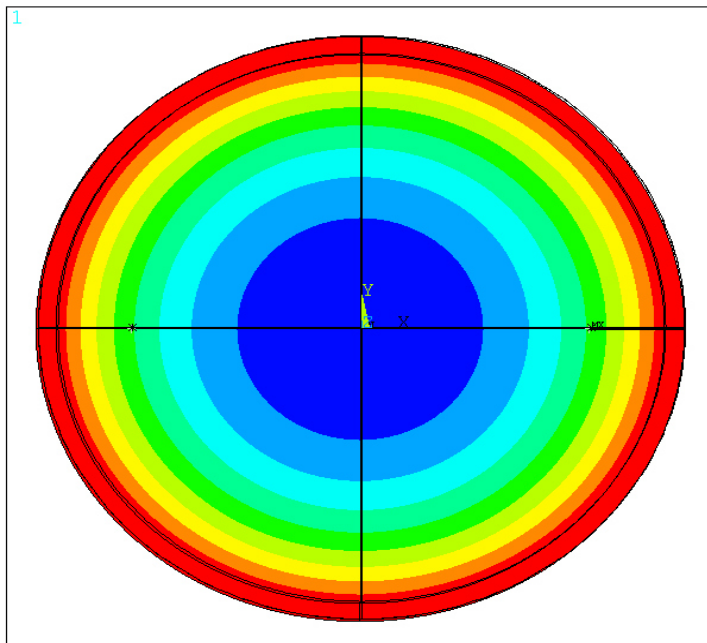
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2880
 TIME=14400
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =383.634
 SMX =1152.82
 383.634
 469.099
 554.564
 640.028
 725.493
 810.958
 896.423
 981.887
 1067.35
 1152.82

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 1365 | 887 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 1387 | 906 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 31,2 | 103,2 | kNm |

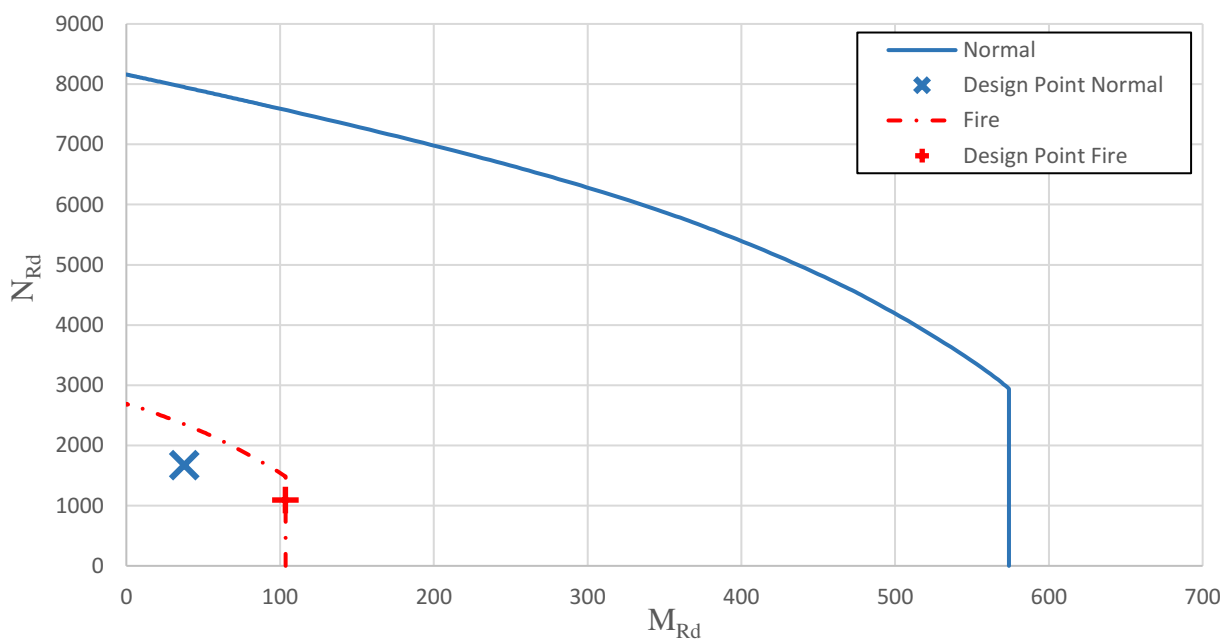



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 55 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R240 | B500B, 8T25, c =70 | REV REV DATE |

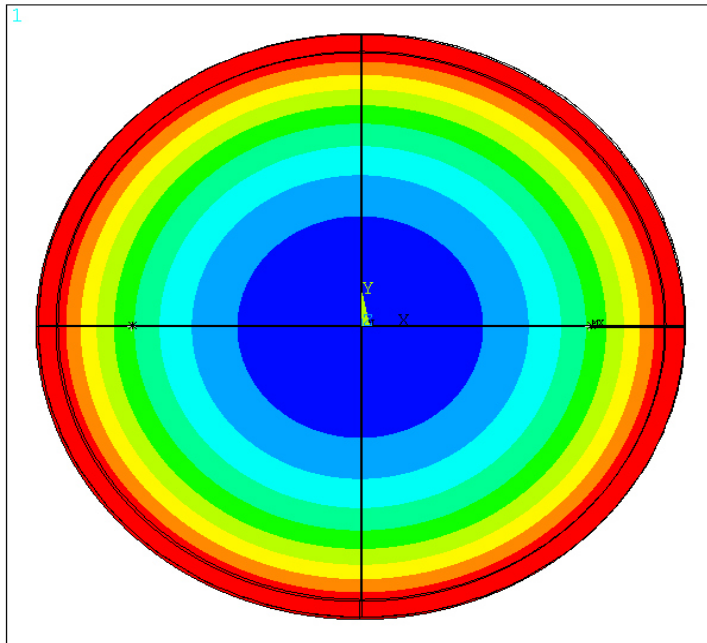
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2880
 TIME=14400
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =374.741
 SMX =1152.82
 374.741
 461.194
 547.647
 634.1
 720.553
 807.006
 893.458
 979.911
 1066.36
 1152.82

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 1650 | 1073 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 1672 | 1092 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 37,6 | 103,4 | kNm |

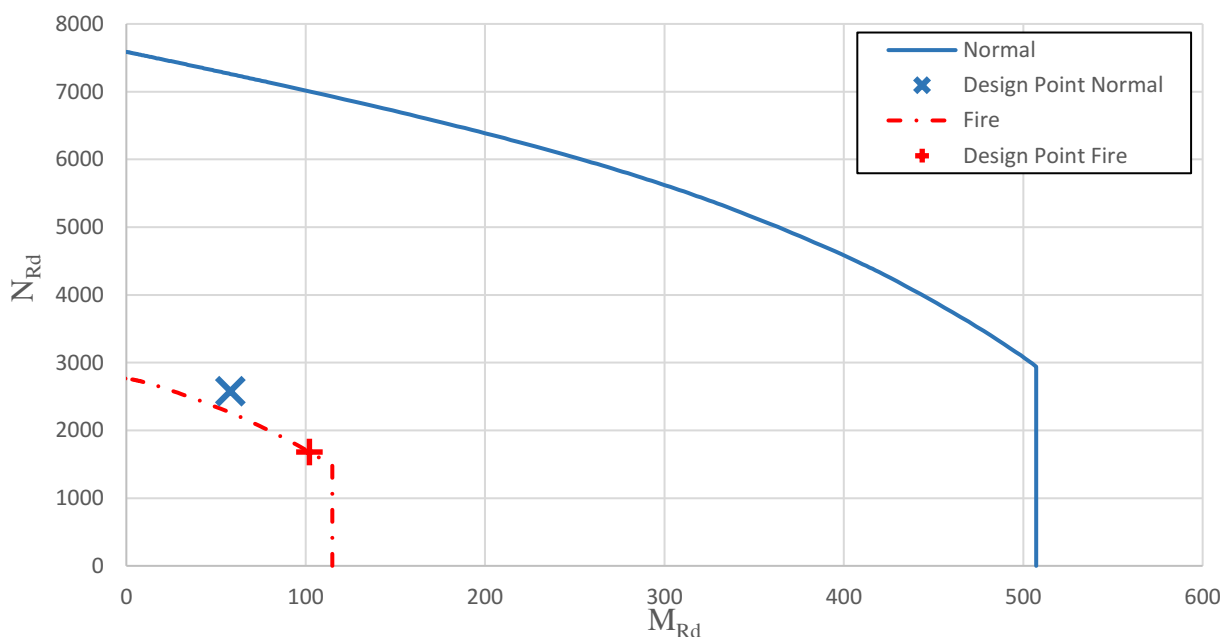



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 56 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R240 | B500B, 8T25, c =70 | REV REV DATE |

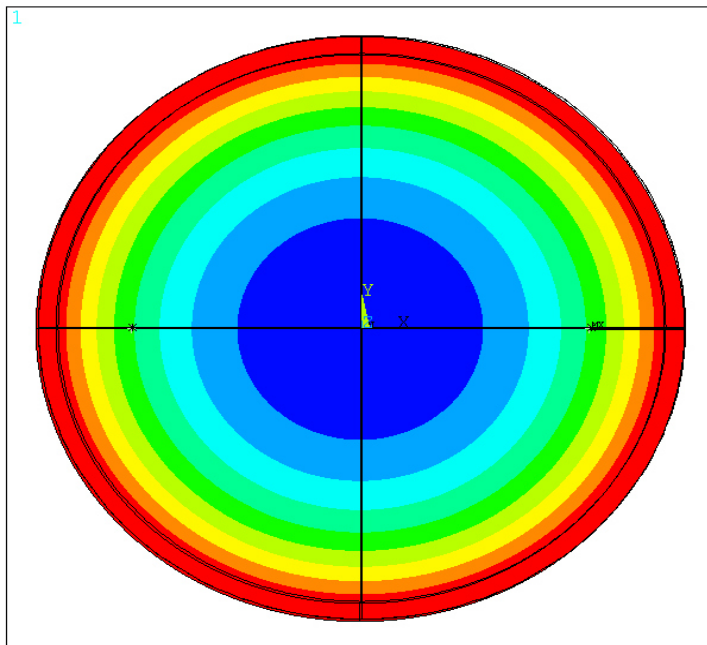
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2880
 TIME=14400
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =374.915
 SMX =1152.82
 374.915
 461.348
 547.782
 634.216
 720.649
 807.083
 893.516
 979.95
 1066.38
 1152.82

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2558 | 1663 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2580 | 1682 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 58,1 | 102,1 | kNm |



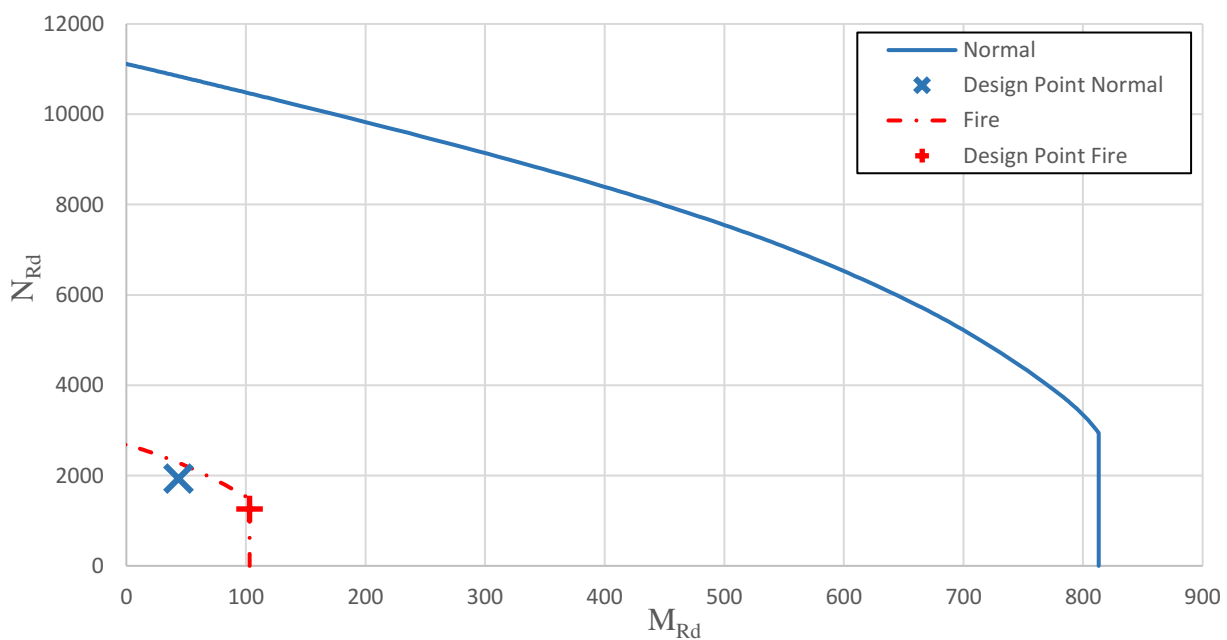
| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 57 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R240 | B500B, 8T25, c =70 | REV DATE |


Steel**1.4462**

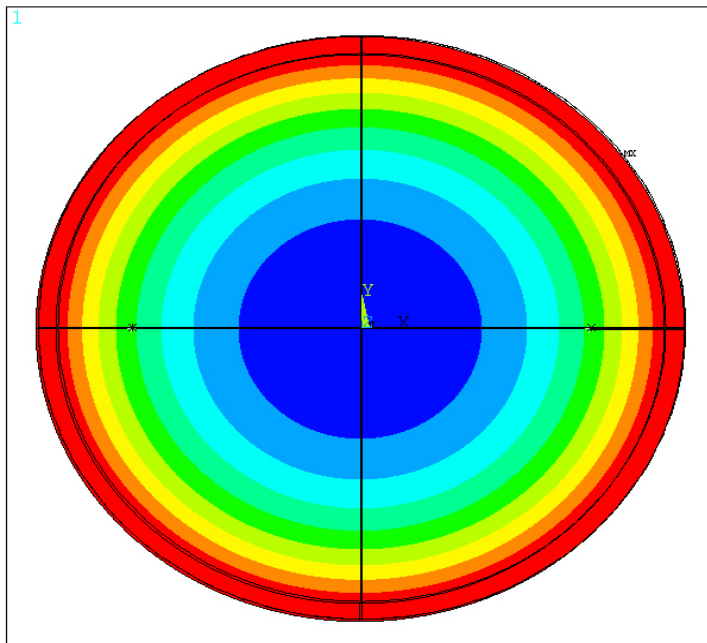
ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2880
 TIME=14400
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =374.915
 SMX =1152.82

| |
|---------|
| 374.915 |
| 461.348 |
| 547.782 |
| 634.216 |
| 720.649 |
| 807.083 |
| 893.516 |
| 979.95 |
| 1066.38 |
| 1152.82 |

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 1911 | 1242 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 0,0 | 0,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 1933 | 1261 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 43,5 | 103,1 | kNm |

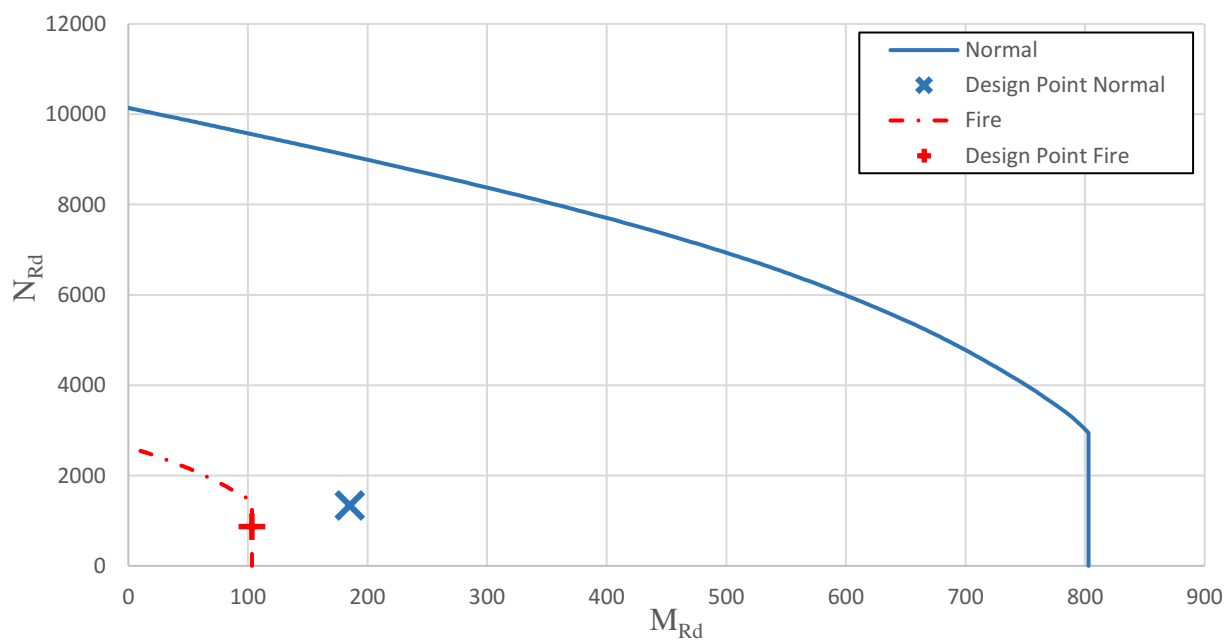



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 58 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R240 | B500B, 8T25, c =70 | REV DATE |

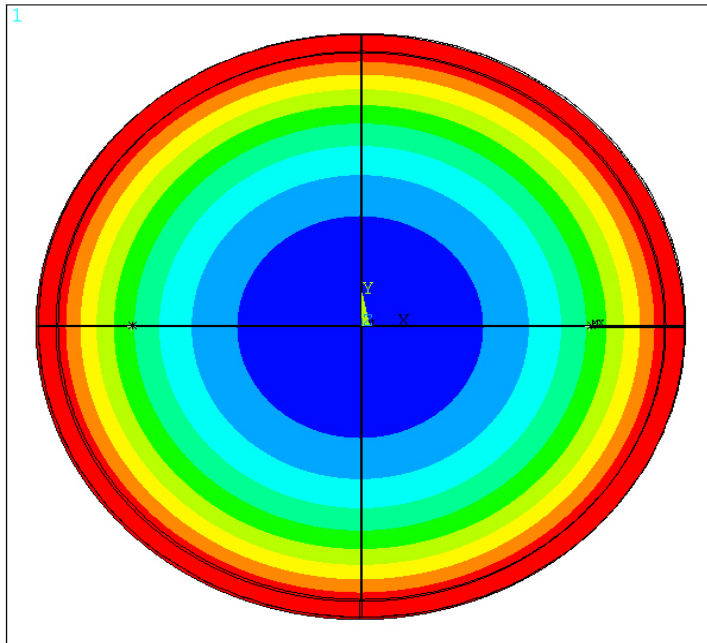
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2880
 TIME=14400
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =383.634
 SMK =1152.82
 383.634
 469.099
 554.564
 640.028
 725.493
 810.958
 896.423
 981.887
 1067.35
 1152.82

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 1313 | 853 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -185,2 | -8,8 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 92,6 | 4,4 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 1335 | 873 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 185,2 | 103,4 | kNm |

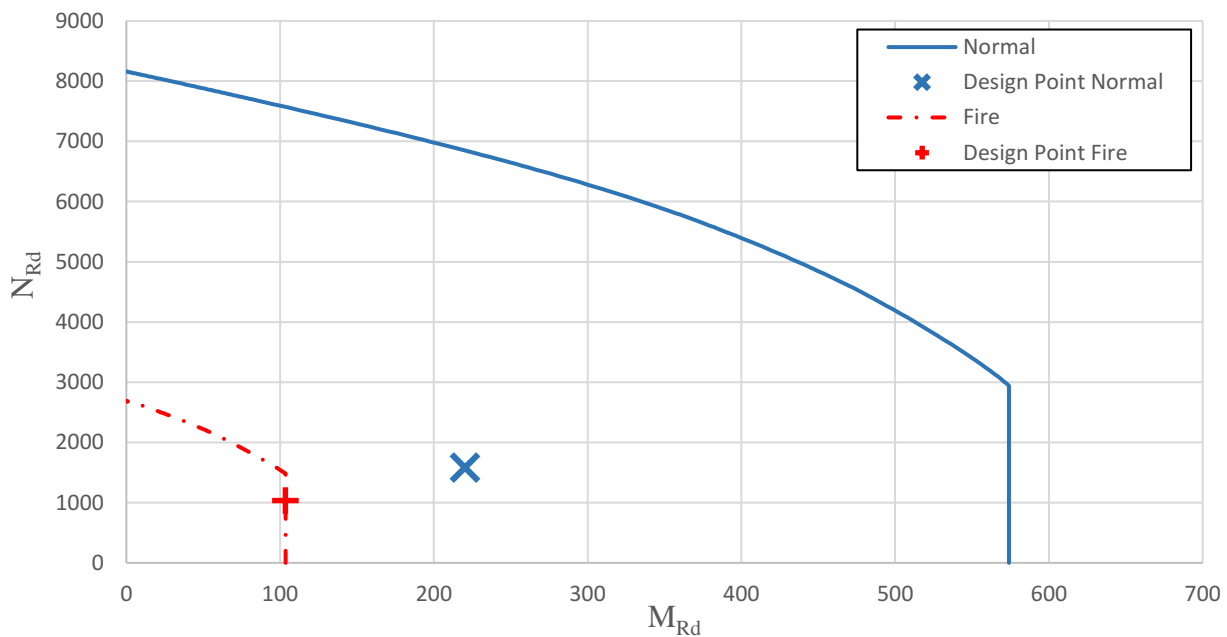



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 59 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R240 | B500B, 8T25, c =70 | REV REV DATE |

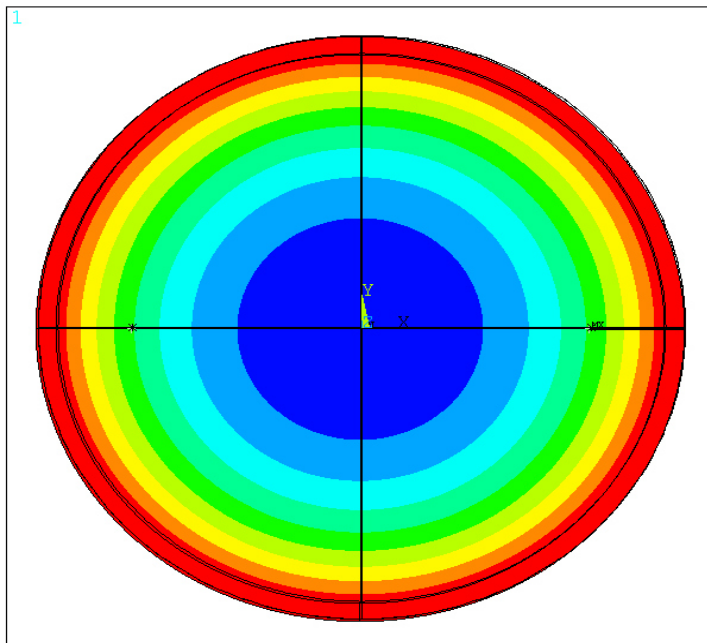
Steel**1.4003**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2880
 TIME=14400
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =374.741
 SMX =1152.82
 374.741
 461.194
 547.647
 634.1
 720.553
 807.006
 893.458
 979.911
 1066.36
 1152.82

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 1561 | 1015 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -220,2 | -12,5 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 110,1 | 6,3 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 1583 | 1034 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 220,2 | 103,5 | kNm |



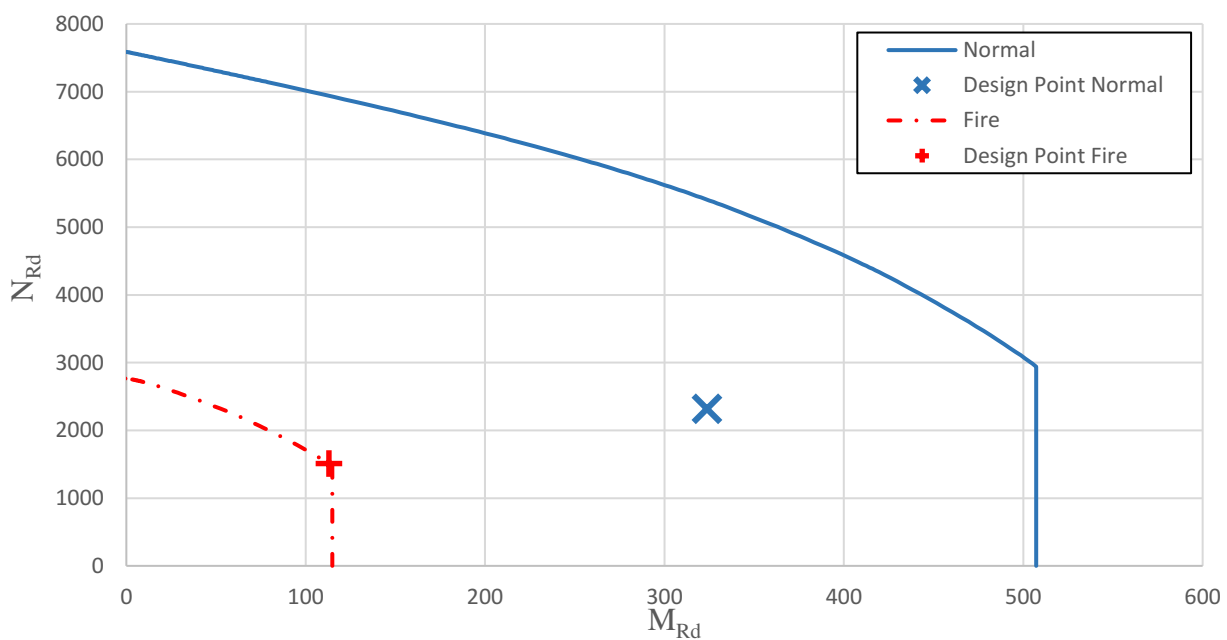
| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 60 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R240 | B500B, 8T25, c =70 | REV REV DATE |


Steel**1.4301**

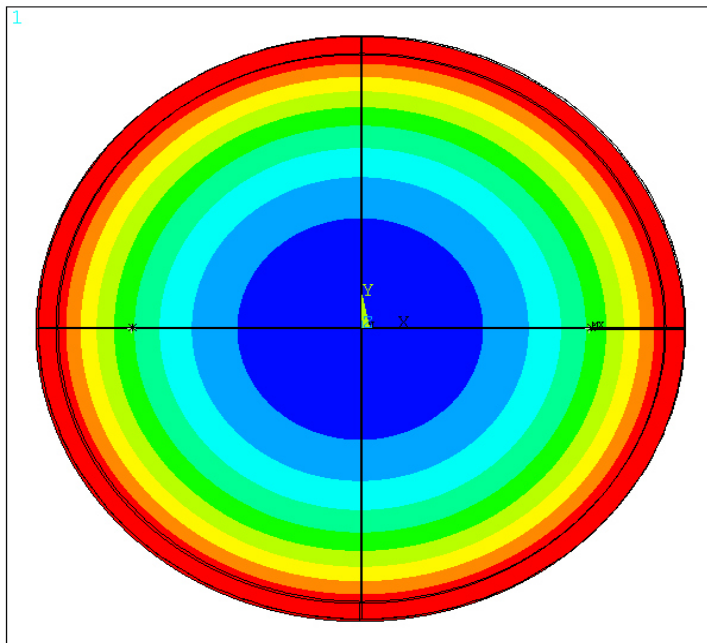
ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2880
 TIME=14400
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =374.915
 SMX =1152.82

| |
|---------|
| 374.915 |
| 461.348 |
| 547.782 |
| 634.216 |
| 720.649 |
| 807.083 |
| 893.516 |
| 979.95 |
| 1066.38 |
| 1152.82 |

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 2295 | 1492 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -323,8 | -34,4 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 161,9 | 17,2 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2317 | 1511 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 323,8 | 113,0 | kNm |



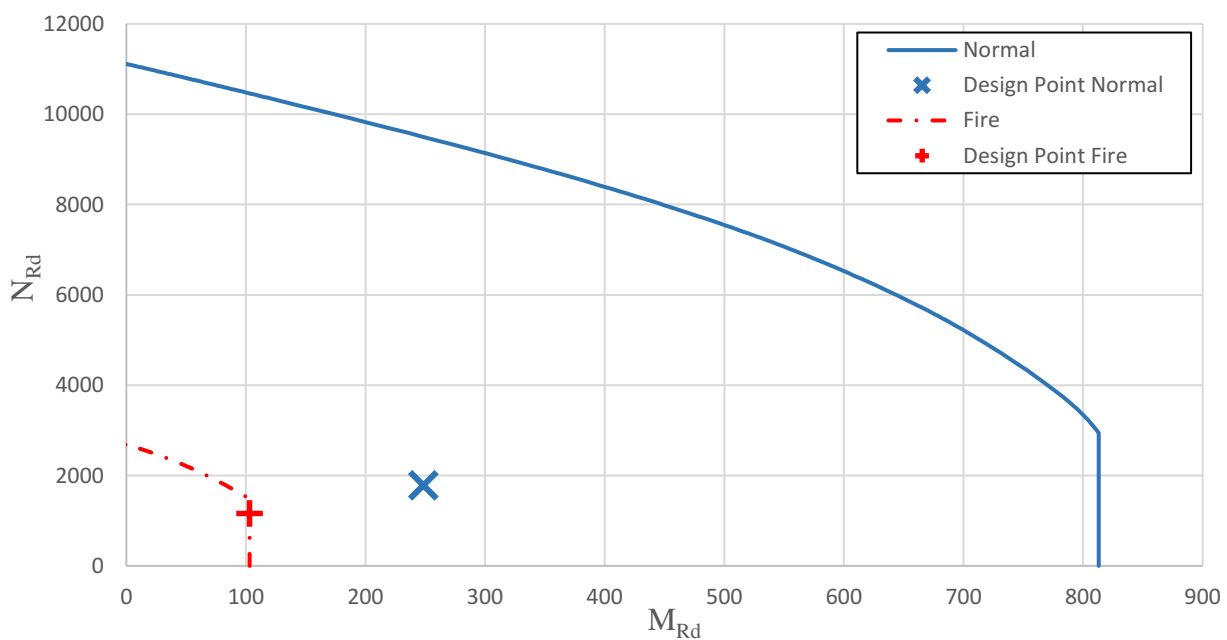
| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 61 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R240 | B500B, 8T25, c =70 | REV DATE |


Steel**1.4462**

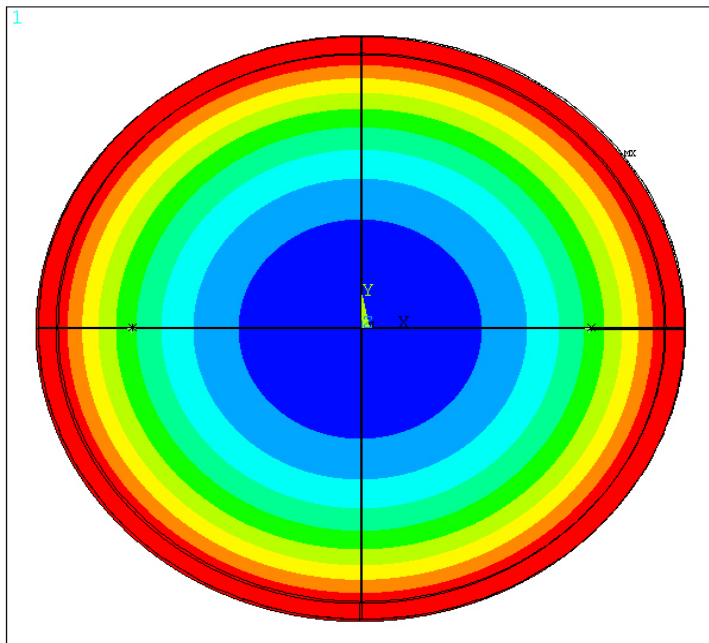
ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2880
 TIME=14400
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =374.915
 SMX =1152.82

| |
|---------|
| 374.915 |
| 461.348 |
| 547.782 |
| 634.216 |
| 720.649 |
| 807.083 |
| 893.516 |
| 979.95 |
| 1066.38 |
| 1152.82 |

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 1761 | 1145 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d,top}$ | -248,4 | -18,0 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d,bot}$ | 124,2 | 9,0 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 1783 | 1164 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 248,4 | 102,9 | kNm |

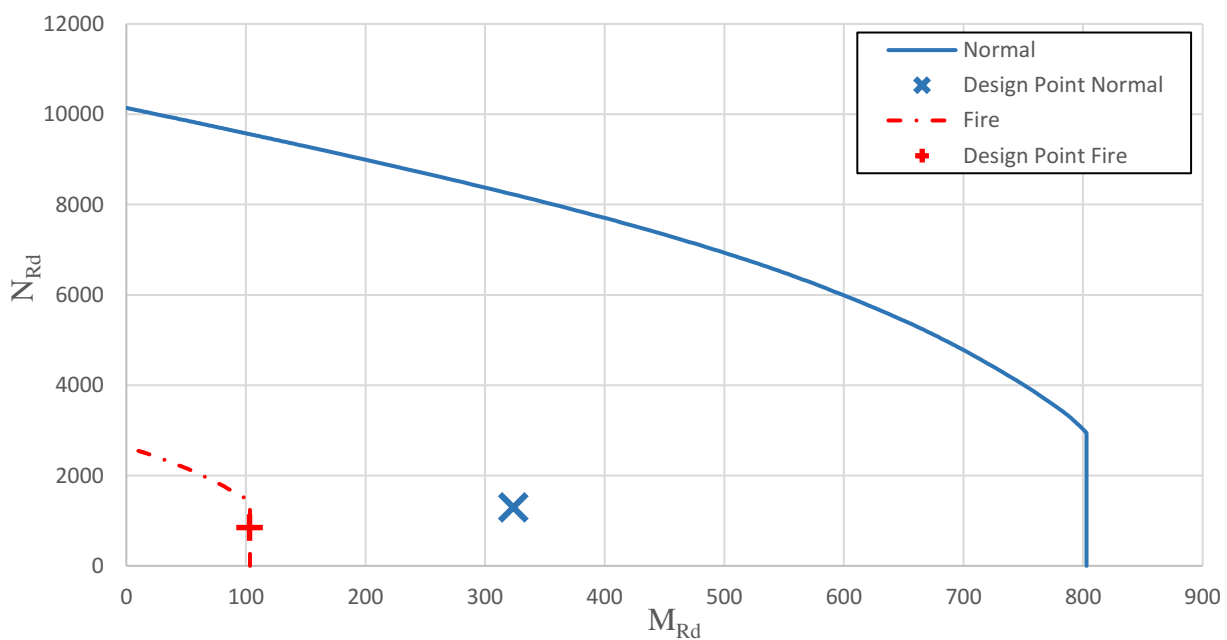



| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 62 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R240 | B500B, 8T25, c =70 | REV DATE |

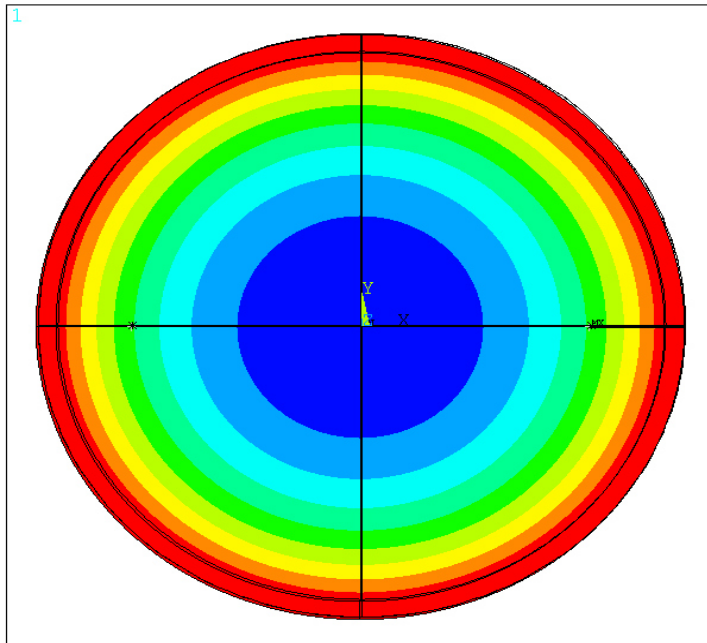
Steel**S355**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2880
 TIME=14400
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =383.634
 SMK =1152.82
 383.634
 469.099
 554.564
 640.028
 725.493
 810.958
 896.423
 981.887
 1067.35
 1152.82

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 1273 | 827 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -323,5 | -15,4 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 161,8 | 7,7 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 1295 | 847 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 323,5 | 103,1 | kNm |



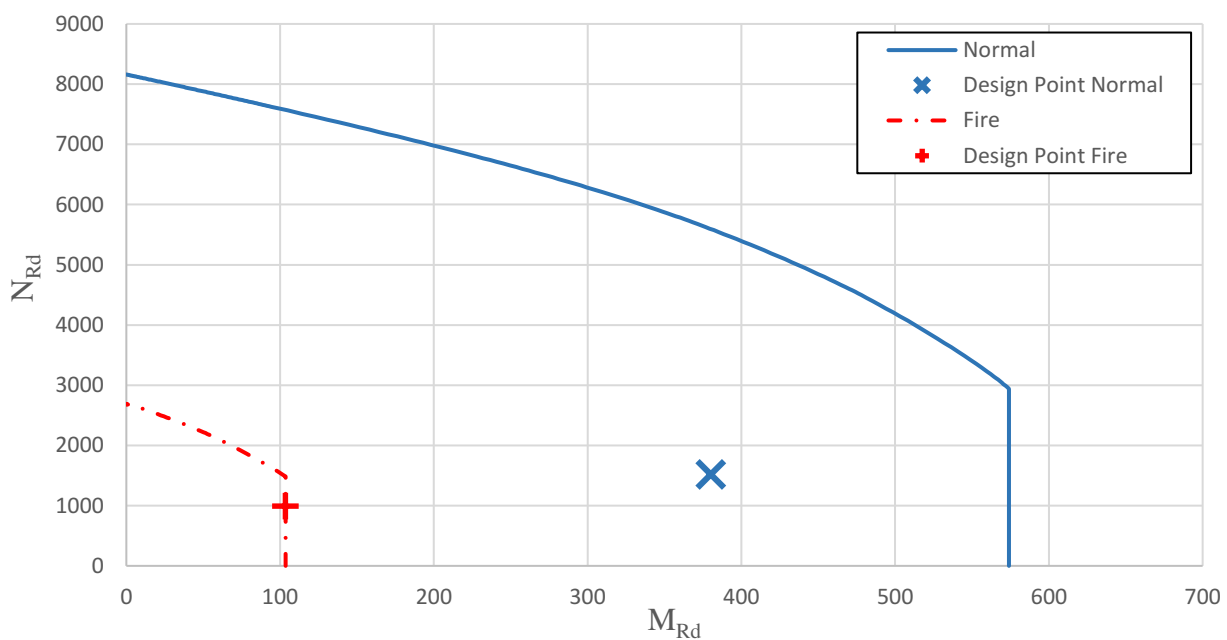
| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 63 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R240 | B500B, 8T25, c =70 | REV DATE |


Steel**1.4003**

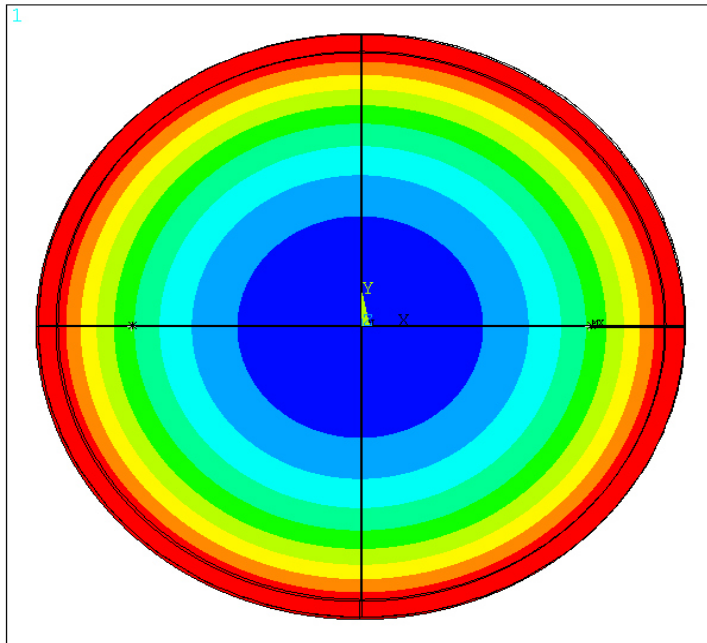
ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2880
 TIME=14400
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =374.741
 SMX =1152.82

| |
|---------|
| 374.741 |
| 461.194 |
| 547.647 |
| 634.1 |
| 720.553 |
| 807.006 |
| 893.458 |
| 979.911 |
| 1066.36 |
| 1152.82 |

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 1496 | 972 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d,top}$ | -380,2 | -21,6 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d,bot}$ | 190,1 | 10,8 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 1518 | 992 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 380,2 | 103,5 | kNm |

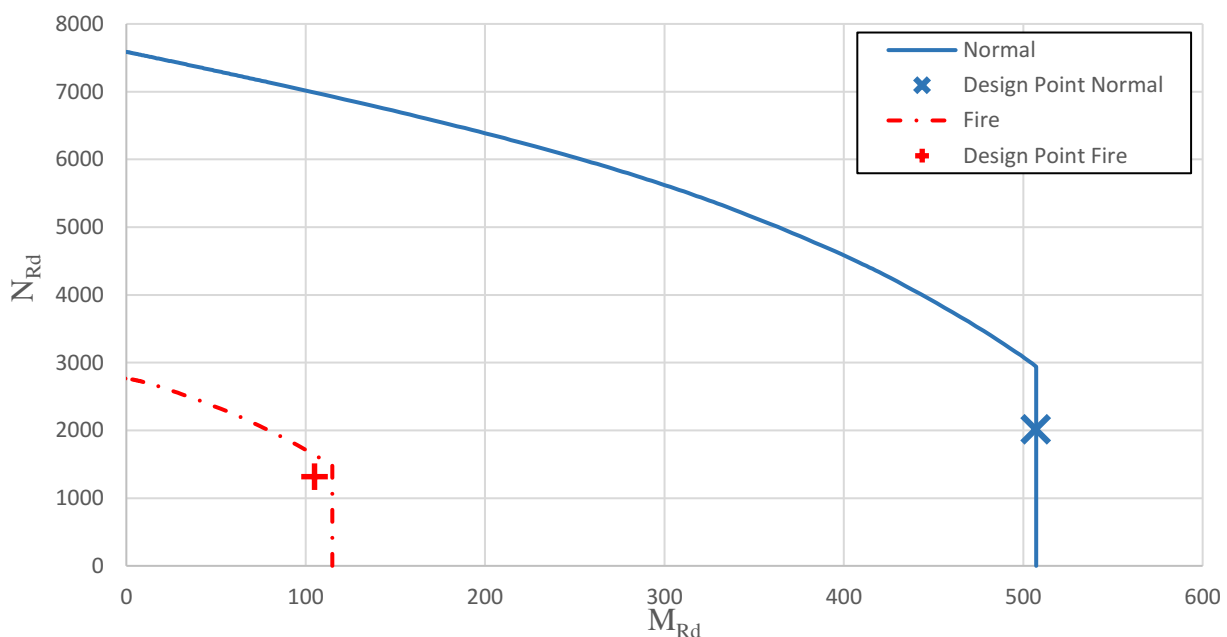



| | | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 64 |
| | Composite column L =4500 | CHS 406,4x12,5 Concrete C40/50 | Date 22.4.2019 |
| | Fire Class R240 | B500B, 8T25, c =70 | REV REV DATE |

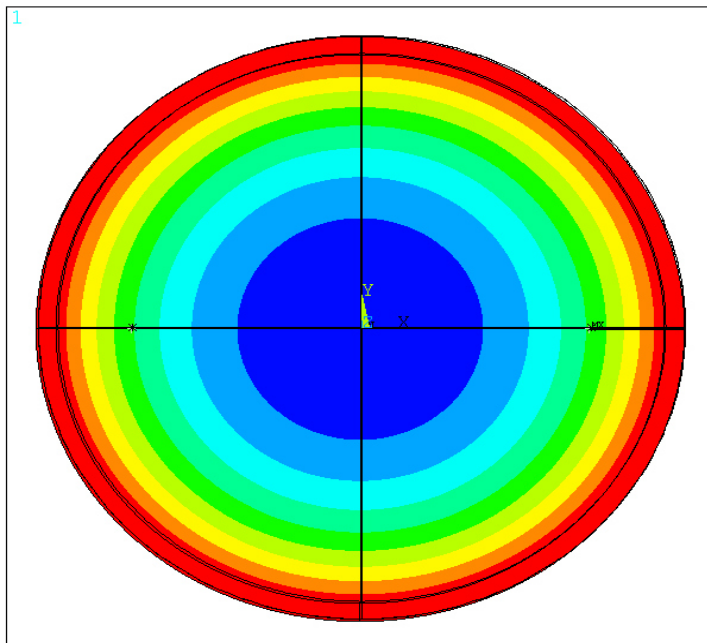
Steel**1.4301**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2880
 TIME=14400
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =374.915
 SMX =1152.82
 374.915
 461.348
 547.782
 634.216
 720.649
 807.083
 893.516
 979.95
 1066.38
 1152.82

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 1995 | 1297 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -507,0 | -53,8 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 253,5 | 26,9 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 2017 | 1316 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 507,0 | 104,9 | kNm |

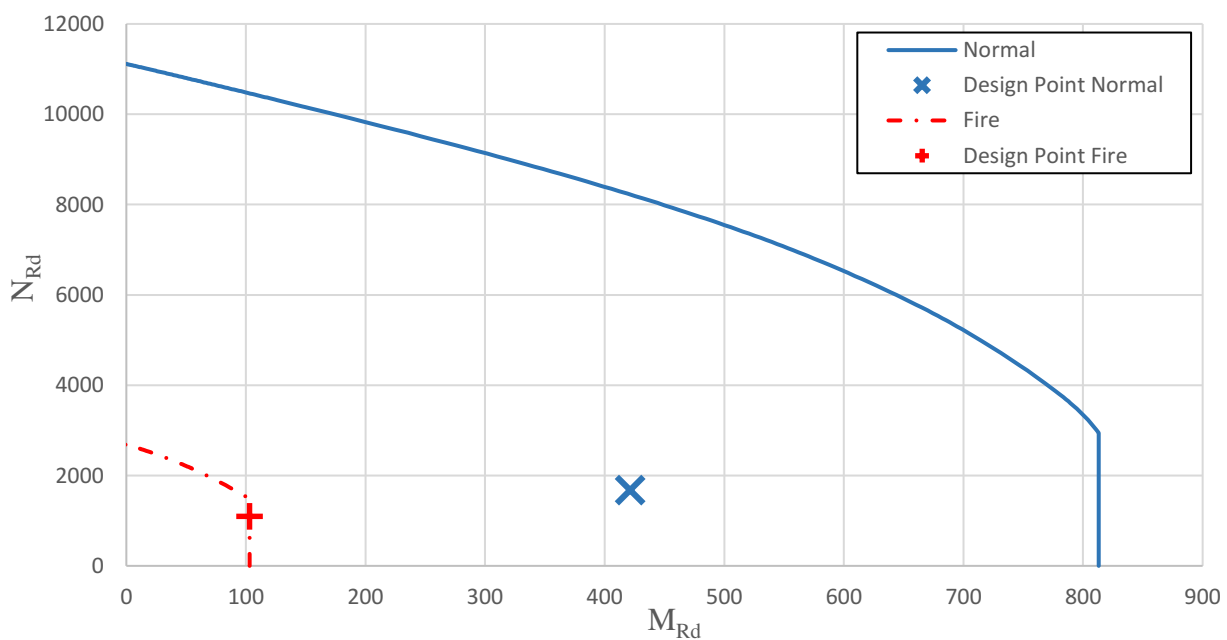


| | | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|
|  A-INSINÖÖRIT | RAK | Project N:o | Page 65 |
| | Composite column | CHS 406,4x12,5 | Date 22.4.2019 |
| | L =4500 | Concrete C40/50 | REV |
| | Fire Class R240 | B500B, 8T25, c =70 | REV DATE |

Steel**1.4462**

ANSYS Release 16.0
 PLOT NO. 1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2880
 TIME=14400
 /EXPANDED
 TEMP (AVG)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=4
 AVRES=Mat
 SMN =374.915
 SMK =1152.82
 374.915
 461.348
 547.782
 634.216
 720.649
 807.083
 893.516
 979.95
 1066.38
 1152.82

| | | Normal | FIRE | |
|--------------------------|--------------|---------------|-------------|-----|
| Buckling length | L_{cr} | 4500 | 3150 | mm |
| Buckling Coefficient | L_{cr} / L | 1 | 0,7 | |
| Normal Force | N_d | 1658 | 1078 | kN |
| Bending moment at top | $M_{d.top}$ | -421,4 | -30,5 | kNm |
| Bending moment at bottom | $M_{d.bot}$ | 210,7 | 15,3 | kNm |
| Design compression load | N_{Ed} | 1680 | 1097 | kN |
| Design bending moment | M_{Ed} | 421,4 | 103,1 | kNm |



| CHS 406,4x12,5, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 25 | R120 c = 45 | R180 c = 75 | R240 c = 95 |
|---------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 7650 | 3067 | 1490 | 852 | 438 |
| | | 1.4003 | 5237 | 4408 | 1750 | 755 | 319 |
| | | 1.4301 | 4768 | 4768 | 2710 | 1878 | 1149 |
| | | 1.4462 | 6927 | 6165 | 1152 | 610 | 322 |
| | L5100 | S355 | 7292 | 2513 | 1217 | 691 | 352 |
| | | 1.4003 | 4947 | 3745 | 1470 | 630 | 262 |
| | | 1.4301 | 4503 | 4503 | 2293 | 1577 | 956 |
| | | 1.4462 | 6433 | 5936 | 989 | 520 | 267 |
| | L9000 | S355 | 2912 | 945 | 435 | 226 | 93 |
| | | 1.4003 | 3245 | 1688 | 611 | 242 | 79 |
| | | 1.4301 | 2944 | 2944 | 1004 | 651 | 372 |
| | | 1.4462 | 3777 | 3460 | 471 | 216 | 87 |
| e1 | L4500 | S355 | 4295 | 2132 | 1213 | 754 | 408 |
| | | 1.4003 | 3180 | 1248 | 1119 | 580 | 274 |
| | | 1.4301 | 2762 | 1712 | 1162 | 1169 | 850 |
| | | 1.4462 | 4490 | 2136 | 405 | 386 | 254 |
| | L5100 | S355 | 4294 | 1848 | 1024 | 624 | 331 |
| | | 1.4003 | 3179 | 1249 | 996 | 503 | 230 |
| | | 1.4301 | 2762 | 1713 | 1161 | 1043 | 739 |
| | | 1.4462 | 4489 | 2136 | 405 | 347 | 220 |
| | L9000 | S355 | 2437 | 827 | 405 | 216 | 91 |
| | | 1.4003 | 3053 | 1047 | 503 | 216 | 73 |
| | | 1.4301 | 2680 | 1712 | 718 | 534 | 330 |
| | | 1.4462 | 3699 | 2009 | 300 | 177 | 78 |
| e2 | L4500 | S355 | 2729 | 1715 | 1054 | 690 | 387 |
| | | 1.4003 | 1806 | 693 | 771 | 491 | 244 |
| | | 1.4301 | 1533 | 951 | 645 | 768 | 704 |
| | | 1.4462 | 2824 | 1186 | 225 | 268 | 219 |
| | L5100 | S355 | 2729 | 1525 | 908 | 579 | 316 |
| | | 1.4003 | 1806 | 693 | 771 | 434 | 209 |
| | | 1.4301 | 1533 | 951 | 645 | 768 | 626 |
| | | 1.4462 | 2824 | 1186 | 225 | 269 | 190 |
| | L9000 | S355 | 2154 | 753 | 384 | 210 | 89 |
| | | 1.4003 | 1806 | 694 | 442 | 200 | 73 |
| | | 1.4301 | 1533 | 952 | 582 | 464 | 304 |
| | | 1.4462 | 2822 | 1188 | 225 | 153 | 73 |

| CHS 406,4x6, C40/50, 8T25 | | | R30 c = 20 | R60 c = 25 | R120 c = 45 | R180 c = 75 | R240 c = 95 |
|------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 6027 | 5589 | 3442 | 2079 | 1167 |
| | | 1.4003 | 4908 | 4894 | 4166 | 2413 | 1353 |
| | | 1.4301 | 4638 | 4623 | 4567 | 3272 | 1968 |
| | | 1.4462 | 4950 | 4933 | 4742 | 2809 | 1511 |
| | L5100 | S355 | 5723 | 4580 | 2750 | 1646 | 916 |
| | | 1.4003 | 4554 | 4538 | 3349 | 1919 | 1066 |
| | | 1.4301 | 4299 | 4283 | 4169 | 2642 | 1567 |
| | | 1.4462 | 4573 | 4554 | 4082 | 2245 | 1195 |
| | L9000 | S355 | 2562 | 1639 | 933 | 528 | 270 |
| | | 1.4003 | 2656 | 2402 | 1171 | 631 | 324 |
| | | 1.4301 | 2493 | 2475 | 1511 | 912 | 512 |
| | | 1.4462 | 2601 | 2582 | 1487 | 759 | 372 |
| e1 | L4500 | S355 | 3414 | 3393 | 2929 | 1912 | 1121 |
| | | 1.4003 | 3156 | 3135 | 3008 | 2168 | 1286 |
| | | 1.4301 | 2872 | 2841 | 2713 | 2529 | 1767 |
| | | 1.4462 | 2983 | 2955 | 2841 | 2405 | 1413 |
| | L5100 | S355 | 3413 | 3392 | 2410 | 1540 | 887 |
| | | 1.4003 | 3155 | 3134 | 2787 | 1759 | 1023 |
| | | 1.4301 | 2872 | 2841 | 2713 | 2248 | 1437 |
| | | 1.4462 | 2983 | 2955 | 2841 | 1979 | 1132 |
| | L9000 | S355 | 2164 | 1478 | 889 | 516 | 267 |
| | | 1.4003 | 2379 | 1978 | 1092 | 612 | 320 |
| | | 1.4301 | 2190 | 2164 | 1347 | 858 | 497 |
| | | 1.4462 | 2240 | 2216 | 1322 | 725 | 365 |
| e2 | L4500 | S355 | 1967 | 1950 | 1879 | 1773 | 1087 |
| | | 1.4003 | 1758 | 1741 | 1670 | 1566 | 1236 |
| | | 1.4301 | 1595 | 1577 | 1506 | 1404 | 1345 |
| | | 1.4462 | 1656 | 1640 | 1577 | 1484 | 1342 |
| | L5100 | S355 | 1967 | 1950 | 1879 | 1464 | 865 |
| | | 1.4003 | 1758 | 1741 | 1670 | 1566 | 992 |
| | | 1.4301 | 1595 | 1577 | 1506 | 1404 | 1345 |
| | | 1.4462 | 1656 | 1640 | 1577 | 1484 | 1086 |
| | L9000 | S355 | 1923 | 1371 | 857 | 506 | 265 |
| | | 1.4003 | 1761 | 1734 | 1035 | 597 | 316 |
| | | 1.4301 | 1595 | 1577 | 1241 | 819 | 484 |
| | | 1.4462 | 1658 | 1640 | 1212 | 699 | 360 |

| CHS 406,4x6, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 25 | R120 c = 45 | R180 c = 75 | R240 c = 95 |
|------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 4515 | 1793 | 912 | 515 | 247 |
| | | 1.4003 | 3790 | 2301 | 1000 | 424 | 179 |
| | | 1.4301 | 3522 | 3522 | 1499 | 1047 | 630 |
| | | 1.4462 | 3842 | 3842 | 540 | 303 | 159 |
| | L5100 | S355 | 3694 | 1491 | 752 | 420 | 198 |
| | | 1.4003 | 3524 | 1957 | 841 | 352 | 147 |
| | | 1.4301 | 3271 | 3271 | 1265 | 876 | 524 |
| | | 1.4462 | 3554 | 3554 | 464 | 256 | 131 |
| | L9000 | S355 | 1395 | 590 | 273 | 134 | 43 |
| | | 1.4003 | 2080 | 878 | 343 | 124 | 31 |
| | | 1.4301 | 1918 | 1591 | 543 | 350 | 188 |
| | | 1.4462 | 2035 | 1672 | 206 | 93 | 27 |
| e1 | L4500 | S355 | 2269 | 1039 | 670 | 430 | 222 |
| | | 1.4003 | 1710 | 643 | 612 | 312 | 149 |
| | | 1.4301 | 1595 | 917 | 647 | 656 | 469 |
| | | 1.4462 | 1881 | 1006 | 193 | 206 | 123 |
| | L5100 | S355 | 2147 | 928 | 578 | 360 | 181 |
| | | 1.4003 | 1711 | 643 | 547 | 271 | 125 |
| | | 1.4301 | 1596 | 917 | 647 | 582 | 406 |
| | | 1.4462 | 1881 | 1007 | 193 | 170 | 104 |
| | L9000 | S355 | 1090 | 470 | 243 | 124 | 41 |
| | | 1.4003 | 1689 | 537 | 274 | 109 | 27 |
| | | 1.4301 | 1548 | 891 | 388 | 286 | 170 |
| | | 1.4462 | 1708 | 955 | 128 | 73 | 27 |
| e2 | L4500 | S355 | 1260 | 612 | 552 | 379 | 206 |
| | | 1.4003 | 949 | 357 | 393 | 260 | 130 |
| | | 1.4301 | 886 | 509 | 360 | 439 | 389 |
| | | 1.4462 | 1044 | 559 | 107 | 134 | 104 |
| | L5100 | S355 | 1261 | 612 | 487 | 325 | 169 |
| | | 1.4003 | 950 | 357 | 393 | 230 | 112 |
| | | 1.4301 | 886 | 509 | 360 | 438 | 345 |
| | | 1.4462 | 1044 | 559 | 108 | 134 | 90 |
| | L9000 | S355 | 929 | 405 | 224 | 119 | 40 |
| | | 1.4003 | 952 | 358 | 238 | 100 | 27 |
| | | 1.4301 | 888 | 511 | 315 | 249 | 155 |
| | | 1.4462 | 1044 | 560 | 101 | 63 | 23 |

| CHS 355,6x12,5, C40/50, 8T16 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 45 | R180 c = 60 | R240 c = 70 |
|---------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 7088 | 4077 | 2258 | 1268 | 659 |
| | | 1.4003 | 5124 | 5124 | 3057 | 1650 | 845 |
| | | 1.4301 | 4739 | 4739 | 3755 | 2431 | 1444 |
| | | 1.4462 | 6349 | 6341 | 3606 | 2028 | 1019 |
| | L5100 | S355 | 6281 | 3368 | 1796 | 1002 | 516 |
| | | 1.4003 | 4769 | 4769 | 2557 | 1316 | 667 |
| | | 1.4301 | 4408 | 4408 | 3309 | 2083 | 1213 |
| | | 1.4462 | 5800 | 5800 | 3191 | 1688 | 810 |
| | L9000 | S355 | 2463 | 1172 | 592 | 310 | 140 |
| | | 1.4003 | 2837 | 2232 | 893 | 430 | 197 |
| | | 1.4301 | 2611 | 2611 | 1320 | 772 | 417 |
| | | 1.4462 | 3116 | 3116 | 1285 | 583 | 253 |
| e1 | L4500 | S355 | 4200 | 3498 | 2075 | 1212 | 644 |
| | | 1.4003 | 3262 | 3262 | 2679 | 1530 | 814 |
| | | 1.4301 | 2990 | 2990 | 2883 | 2088 | 1314 |
| | | 1.4462 | 4323 | 4251 | 2893 | 1811 | 961 |
| | L5100 | S355 | 4199 | 2901 | 1677 | 966 | 506 |
| | | 1.4003 | 3261 | 3261 | 2242 | 1237 | 648 |
| | | 1.4301 | 2989 | 2989 | 2710 | 1821 | 1113 |
| | | 1.4462 | 4322 | 4250 | 2602 | 1508 | 773 |
| | L9000 | S355 | 2192 | 1109 | 577 | 306 | 139 |
| | | 1.4003 | 2550 | 1866 | 849 | 421 | 195 |
| | | 1.4301 | 2335 | 2335 | 1187 | 725 | 402 |
| | | 1.4462 | 2894 | 2444 | 1147 | 559 | 249 |
| e2 | L4500 | S355 | 2812 | 2812 | 1956 | 1173 | 633 |
| | | 1.4003 | 2136 | 2136 | 2035 | 1451 | 793 |
| | | 1.4301 | 1911 | 1911 | 1810 | 1749 | 1232 |
| | | 1.4462 | 2841 | 2651 | 2528 | 1666 | 922 |
| | L5100 | S355 | 2812 | 2631 | 1598 | 942 | 500 |
| | | 1.4003 | 2136 | 2136 | 2035 | 1185 | 634 |
| | | 1.4301 | 1911 | 1911 | 1810 | 1655 | 1043 |
| | | 1.4462 | 2841 | 2652 | 2226 | 1397 | 747 |
| | L9000 | S355 | 2025 | 1065 | 567 | 303 | 139 |
| | | 1.4003 | 2114 | 1663 | 820 | 414 | 193 |
| | | 1.4301 | 1912 | 1912 | 1104 | 693 | 392 |
| | | 1.4462 | 2454 | 2079 | 1062 | 542 | 246 |

| CHS 355,6x12,5, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 45 | R180 c = 60 | R240 c = 70 |
|---------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 5635 | 1941 | 931 | 523 | 264 |
| | | 1.4003 | 4072 | 3079 | 1186 | 497 | 210 |
| | | 1.4301 | 3687 | 3687 | 1877 | 1293 | 771 |
| | | 1.4462 | 5381 | 4488 | 777 | 426 | 220 |
| | L5100 | S355 | 4945 | 1577 | 753 | 419 | 208 |
| | | 1.4003 | 3814 | 2607 | 988 | 412 | 172 |
| | | 1.4301 | 3452 | 3452 | 1579 | 1078 | 639 |
| | | 1.4462 | 4933 | 4304 | 667 | 363 | 182 |
| | L9000 | S355 | 1788 | 566 | 251 | 123 | 44 |
| | | 1.4003 | 2356 | 1144 | 392 | 147 | 43 |
| | | 1.4301 | 2128 | 2105 | 670 | 432 | 237 |
| | | 1.4462 | 2696 | 2328 | 310 | 145 | 53 |
| e1 | L4500 | S355 | 3510 | 1491 | 809 | 483 | 251 |
| | | 1.4003 | 2566 | 1057 | 831 | 406 | 187 |
| | | 1.4301 | 2284 | 1413 | 986 | 868 | 602 |
| | | 1.4462 | 3683 | 1750 | 325 | 293 | 181 |
| | L5100 | S355 | 3509 | 1266 | 670 | 392 | 200 |
| | | 1.4003 | 2565 | 1057 | 729 | 348 | 155 |
| | | 1.4301 | 2284 | 1414 | 921 | 764 | 517 |
| | | 1.4462 | 3683 | 1751 | 325 | 258 | 155 |
| | L9000 | S355 | 1570 | 518 | 241 | 121 | 43 |
| | | 1.4003 | 2256 | 765 | 340 | 136 | 42 |
| | | 1.4301 | 1975 | 1261 | 509 | 366 | 216 |
| | | 1.4462 | 2676 | 1460 | 208 | 123 | 49 |
| e2 | L4500 | S355 | 2331 | 1273 | 737 | 456 | 243 |
| | | 1.4003 | 1547 | 606 | 680 | 359 | 173 |
| | | 1.4301 | 1313 | 810 | 565 | 677 | 517 |
| | | 1.4462 | 2405 | 1003 | 186 | 236 | 161 |
| | L5100 | S355 | 2330 | 1104 | 619 | 374 | 194 |
| | | 1.4003 | 1547 | 606 | 609 | 311 | 145 |
| | | 1.4301 | 1313 | 811 | 566 | 628 | 452 |
| | | 1.4462 | 2404 | 1004 | 187 | 213 | 140 |
| | L9000 | S355 | 1439 | 487 | 233 | 119 | 43 |
| | | 1.4003 | 1547 | 606 | 308 | 129 | 40 |
| | | 1.4301 | 1313 | 811 | 432 | 330 | 202 |
| | | 1.4462 | 2236 | 1005 | 169 | 107 | 46 |

| CHS 355,6x6, C40/50, 8T16 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 45 | R180 c = 60 | R240 c = 70 |
|------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 5050 | 3728 | 2063 | 1167 | 619 |
| | | 1.4003 | 3873 | 3873 | 2597 | 1394 | 744 |
| | | 1.4301 | 3652 | 3652 | 3220 | 1996 | 1139 |
| | | 1.4462 | 4017 | 4017 | 3159 | 1657 | 845 |
| | L5100 | S355 | 4639 | 2985 | 1637 | 920 | 483 |
| | | 1.4003 | 3545 | 3545 | 2073 | 1104 | 584 |
| | | 1.4301 | 3339 | 3339 | 2681 | 1601 | 906 |
| | | 1.4462 | 3650 | 3650 | 2626 | 1320 | 667 |
| | L9000 | S355 | 1660 | 1031 | 535 | 283 | 131 |
| | | 1.4003 | 1920 | 1593 | 701 | 351 | 168 |
| | | 1.4301 | 1798 | 1798 | 943 | 540 | 289 |
| | | 1.4462 | 1907 | 1907 | 927 | 433 | 198 |
| e1 | L4500 | S355 | 3000 | 2990 | 1853 | 1103 | 601 |
| | | 1.4003 | 2625 | 2625 | 2219 | 1291 | 715 |
| | | 1.4301 | 2455 | 2455 | 2321 | 1710 | 1042 |
| | | 1.4462 | 2664 | 2664 | 2505 | 1474 | 802 |
| | L5100 | S355 | 2999 | 2492 | 1501 | 879 | 472 |
| | | 1.4003 | 2625 | 2625 | 1825 | 1038 | 567 |
| | | 1.4301 | 2454 | 2454 | 2168 | 1409 | 843 |
| | | 1.4462 | 2663 | 2663 | 2112 | 1201 | 639 |
| | L9000 | S355 | 1471 | 964 | 519 | 278 | 130 |
| | | 1.4003 | 1771 | 1385 | 668 | 343 | 166 |
| | | 1.4301 | 1636 | 1636 | 869 | 515 | 281 |
| | | 1.4462 | 1728 | 1710 | 852 | 419 | 195 |
| e2 | L4500 | S355 | 1882 | 1882 | 1722 | 1059 | 588 |
| | | 1.4003 | 1571 | 1571 | 1470 | 1223 | 696 |
| | | 1.4301 | 1432 | 1432 | 1330 | 1270 | 978 |
| | | 1.4462 | 1588 | 1588 | 1499 | 1362 | 772 |
| | L5100 | S355 | 1882 | 1882 | 1414 | 851 | 464 |
| | | 1.4003 | 1571 | 1571 | 1470 | 993 | 554 |
| | | 1.4301 | 1432 | 1432 | 1330 | 1270 | 801 |
| | | 1.4462 | 1588 | 1588 | 1499 | 1125 | 619 |
| | L9000 | S355 | 1357 | 919 | 508 | 275 | 129 |
| | | 1.4003 | 1461 | 1262 | 647 | 337 | 164 |
| | | 1.4301 | 1346 | 1346 | 820 | 499 | 276 |
| | | 1.4462 | 1432 | 1432 | 803 | 408 | 193 |

| CHS 355,6x6, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 45 | R180 c = 60 | R240 c = 70 |
|------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 2828 | 1146 | 563 | 307 | 143 |
| | | 1.4003 | 2864 | 1609 | 672 | 275 | 115 |
| | | 1.4301 | 2645 | 2645 | 1043 | 714 | 418 |
| | | 1.4462 | 3029 | 3029 | 391 | 214 | 106 |
| | L5100 | S355 | 2294 | 942 | 458 | 245 | 111 |
| | | 1.4003 | 2634 | 1362 | 559 | 227 | 92 |
| | | 1.4301 | 2430 | 2430 | 875 | 591 | 344 |
| | | 1.4462 | 2760 | 2643 | 333 | 180 | 88 |
| | L9000 | S355 | 831 | 350 | 150 | 65 | 12 |
| | | 1.4003 | 1460 | 589 | 213 | 71 | 12 |
| | | 1.4301 | 1339 | 1078 | 359 | 224 | 115 |
| | | 1.4462 | 1461 | 1124 | 141 | 59 | 14 |
| e1 | L4500 | S355 | 1768 | 775 | 462 | 276 | 134 |
| | | 1.4003 | 1419 | 564 | 461 | 223 | 101 |
| | | 1.4301 | 1336 | 773 | 574 | 490 | 332 |
| | | 1.4462 | 1774 | 843 | 172 | 146 | 89 |
| | L5100 | S355 | 1542 | 674 | 388 | 225 | 105 |
| | | 1.4003 | 1419 | 565 | 404 | 189 | 82 |
| | | 1.4301 | 1336 | 774 | 519 | 428 | 282 |
| | | 1.4462 | 1774 | 844 | 172 | 130 | 74 |
| | L9000 | S355 | 703 | 302 | 140 | 63 | 12 |
| | | 1.4003 | 1227 | 396 | 182 | 65 | 12 |
| | | 1.4301 | 1139 | 659 | 275 | 192 | 106 |
| | | 1.4462 | 1334 | 700 | 97 | 50 | 14 |
| e2 | L4500 | S355 | 1198 | 614 | 408 | 256 | 129 |
| | | 1.4003 | 813 | 324 | 374 | 195 | 94 |
| | | 1.4301 | 766 | 444 | 329 | 396 | 289 |
| | | 1.4462 | 1017 | 484 | 99 | 120 | 79 |
| | L5100 | S355 | 1199 | 557 | 348 | 211 | 102 |
| | | 1.4003 | 814 | 324 | 335 | 168 | 77 |
| | | 1.4301 | 766 | 444 | 329 | 356 | 249 |
| | | 1.4462 | 1017 | 484 | 99 | 106 | 67 |
| | L9000 | S355 | 630 | 273 | 134 | 61 | 12 |
| | | 1.4003 | 815 | 319 | 165 | 62 | 11 |
| | | 1.4301 | 766 | 445 | 235 | 174 | 99 |
| | | 1.4462 | 1019 | 485 | 78 | 45 | 11 |

| CHS 323,9x12,5, C40/50, 8T25 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 50 | R180 c = 55 | R240 c = 60 |
|---------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 5073 | 2505 | 1250 | 671 | 299 |
| | | 1.4003 | 4039 | 3798 | 1887 | 912 | 404 |
| | | 1.4301 | 3706 | 3706 | 2458 | 1475 | 784 |
| | | 1.4462 | 5051 | 4617 | 2320 | 1176 | 497 |
| | L5100 | S355 | 4325 | 2005 | 992 | 529 | 232 |
| | | 1.4003 | 3735 | 3438 | 1519 | 729 | 321 |
| | | 1.4301 | 3425 | 3425 | 2145 | 1274 | 658 |
| | | 1.4462 | 4569 | 4298 | 2037 | 954 | 399 |
| | L9000 | S355 | 1591 | 686 | 316 | 154 | 51 |
| | | 1.4003 | 2137 | 1445 | 526 | 233 | 86 |
| | | 1.4301 | 1953 | 1953 | 831 | 470 | 227 |
| | | 1.4462 | 2341 | 2167 | 792 | 331 | 121 |
| e1 | L4500 | S355 | 3477 | 2172 | 1175 | 648 | 292 |
| | | 1.4003 | 2640 | 2640 | 1640 | 852 | 389 |
| | | 1.4301 | 2397 | 2397 | 1989 | 1280 | 711 |
| | | 1.4462 | 3604 | 3156 | 1857 | 1028 | 467 |
| | L5100 | S355 | 3477 | 1785 | 943 | 514 | 228 |
| | | 1.4003 | 2639 | 2539 | 1353 | 689 | 310 |
| | | 1.4301 | 2396 | 2396 | 1734 | 1101 | 592 |
| | | 1.4462 | 3603 | 3081 | 1600 | 852 | 379 |
| | L9000 | S355 | 1448 | 657 | 310 | 152 | 50 |
| | | 1.4003 | 1929 | 1220 | 504 | 229 | 85 |
| | | 1.4301 | 1750 | 1604 | 748 | 439 | 218 |
| | | 1.4462 | 2191 | 1673 | 708 | 317 | 118 |
| e2 | L4500 | S355 | 2367 | 1986 | 1126 | 632 | 289 |
| | | 1.4003 | 1757 | 1757 | 1501 | 813 | 379 |
| | | 1.4301 | 1553 | 1553 | 1468 | 1163 | 656 |
| | | 1.4462 | 2410 | 1932 | 1561 | 945 | 447 |
| | L5100 | S355 | 2366 | 1658 | 912 | 504 | 226 |
| | | 1.4003 | 1757 | 1757 | 1257 | 664 | 304 |
| | | 1.4301 | 1553 | 1553 | 1468 | 997 | 552 |
| | | 1.4462 | 2410 | 1932 | 1375 | 794 | 366 |
| | L9000 | S355 | 1361 | 639 | 307 | 151 | 50 |
| | | 1.4003 | 1616 | 1100 | 489 | 225 | 84 |
| | | 1.4301 | 1452 | 1375 | 701 | 420 | 212 |
| | | 1.4462 | 1896 | 1444 | 658 | 307 | 116 |

| CHS 323,9x12,5, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 50 | R180 c = 55 | R240 c = 60 |
|---------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 4313 | 1403 | 670 | 376 | 188 |
| | | 1.4003 | 3407 | 2388 | 898 | 371 | 158 |
| | | 1.4301 | 3073 | 3073 | 1455 | 992 | 581 |
| | | 1.4462 | 4484 | 3577 | 615 | 330 | 166 |
| | L5100 | S355 | 3641 | 1134 | 538 | 298 | 146 |
| | | 1.4003 | 3168 | 2013 | 744 | 305 | 127 |
| | | 1.4301 | 2857 | 2857 | 1222 | 825 | 478 |
| | | 1.4462 | 4069 | 3420 | 528 | 278 | 137 |
| | L9000 | S355 | 1266 | 395 | 171 | 81 | 25 |
| | | 1.4003 | 1871 | 867 | 286 | 104 | 27 |
| | | 1.4301 | 1686 | 1601 | 508 | 321 | 172 |
| | | 1.4462 | 2115 | 1758 | 235 | 106 | 35 |
| e1 | L4500 | S355 | 3048 | 1137 | 601 | 352 | 181 |
| | | 1.4003 | 2209 | 934 | 661 | 313 | 142 |
| | | 1.4301 | 1960 | 1228 | 835 | 696 | 466 |
| | | 1.4462 | 3207 | 1512 | 288 | 236 | 141 |
| | L5100 | S355 | 2783 | 953 | 492 | 283 | 142 |
| | | 1.4003 | 2208 | 934 | 574 | 264 | 117 |
| | | 1.4301 | 1959 | 1228 | 752 | 608 | 399 |
| | | 1.4462 | 3206 | 1513 | 289 | 208 | 120 |
| | L9000 | S355 | 1141 | 369 | 165 | 80 | 24 |
| | | 1.4003 | 1804 | 608 | 255 | 96 | 27 |
| | | 1.4301 | 1584 | 1010 | 399 | 280 | 158 |
| | | 1.4462 | 2112 | 1156 | 169 | 92 | 33 |
| e2 | L4500 | S355 | 2065 | 1004 | 560 | 338 | 177 |
| | | 1.4003 | 1387 | 549 | 559 | 281 | 134 |
| | | 1.4301 | 1177 | 722 | 513 | 575 | 411 |
| | | 1.4462 | 2136 | 888 | 170 | 198 | 129 |
| | L5100 | S355 | 2064 | 857 | 464 | 274 | 139 |
| | | 1.4003 | 1387 | 549 | 494 | 241 | 111 |
| | | 1.4301 | 1177 | 722 | 513 | 514 | 356 |
| | | 1.4462 | 2136 | 889 | 170 | 177 | 110 |
| | L9000 | S355 | 1067 | 352 | 162 | 79 | 24 |
| | | 1.4003 | 1388 | 503 | 235 | 92 | 27 |
| | | 1.4301 | 1178 | 722 | 346 | 256 | 151 |
| | | 1.4462 | 1805 | 890 | 140 | 83 | 32 |

| CHS 323,9x6, C40/50, 8T25 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 50 | R180 c = 55 | R240 c = 60 |
|------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 3486 | 2120 | 1072 | 567 | 248 |
| | | 1.4003 | 2948 | 2948 | 1451 | 718 | 329 |
| | | 1.4301 | 2757 | 2757 | 1987 | 1141 | 584 |
| | | 1.4462 | 3141 | 3141 | 1918 | 892 | 394 |
| | L5100 | S355 | 2803 | 1693 | 847 | 445 | 192 |
| | | 1.4003 | 2675 | 2675 | 1157 | 568 | 257 |
| | | 1.4301 | 2500 | 2500 | 1601 | 916 | 467 |
| | | 1.4462 | 2820 | 2820 | 1548 | 712 | 311 |
| | L9000 | S355 | 988 | 574 | 265 | 126 | 38 |
| | | 1.4003 | 1389 | 981 | 382 | 172 | 63 |
| | | 1.4301 | 1291 | 1291 | 561 | 308 | 145 |
| | | 1.4462 | 1397 | 1362 | 545 | 229 | 83 |
| e1 | L4500 | S355 | 2404 | 1790 | 996 | 545 | 243 |
| | | 1.4003 | 2066 | 2066 | 1280 | 675 | 319 |
| | | 1.4301 | 1892 | 1892 | 1572 | 985 | 532 |
| | | 1.4462 | 2220 | 2220 | 1506 | 805 | 375 |
| | L5100 | S355 | 2195 | 1475 | 799 | 431 | 188 |
| | | 1.4003 | 2065 | 1969 | 1045 | 540 | 251 |
| | | 1.4301 | 1891 | 1891 | 1320 | 812 | 433 |
| | | 1.4462 | 2220 | 2220 | 1267 | 654 | 298 |
| | L9000 | S355 | 899 | 545 | 260 | 124 | 38 |
| | | 1.4003 | 1273 | 864 | 369 | 168 | 62 |
| | | 1.4301 | 1165 | 1108 | 520 | 294 | 141 |
| | | 1.4462 | 1285 | 1116 | 504 | 222 | 82 |
| e2 | L4500 | S355 | 1523 | 1523 | 949 | 531 | 240 |
| | | 1.4003 | 1239 | 1239 | 1154 | 649 | 312 |
| | | 1.4301 | 1112 | 1112 | 1026 | 898 | 502 |
| | | 1.4462 | 1356 | 1356 | 1281 | 753 | 363 |
| | L5100 | S355 | 1523 | 1352 | 768 | 422 | 187 |
| | | 1.4003 | 1239 | 1239 | 979 | 523 | 246 |
| | | 1.4301 | 1112 | 1112 | 1026 | 752 | 412 |
| | | 1.4462 | 1356 | 1356 | 1124 | 620 | 290 |
| | L9000 | S355 | 845 | 526 | 256 | 124 | 38 |
| | | 1.4003 | 1071 | 798 | 360 | 166 | 62 |
| | | 1.4301 | 976 | 976 | 495 | 286 | 138 |
| | | 1.4462 | 1094 | 991 | 479 | 217 | 81 |

| CHS 323,9x6, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 50 | R180 c = 55 | R240 c = 60 |
|------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 2022 | 828 | 397 | 213 | 97 |
| | | 1.4003 | 2348 | 1248 | 505 | 202 | 84 |
| | | 1.4301 | 2158 | 2158 | 806 | 544 | 313 |
| | | 1.4462 | 2561 | 2429 | 310 | 167 | 82 |
| | L5100 | S355 | 1630 | 675 | 320 | 168 | 74 |
| | | 1.4003 | 2140 | 1050 | 417 | 165 | 66 |
| | | 1.4301 | 1966 | 1937 | 673 | 450 | 257 |
| | | 1.4462 | 2306 | 2033 | 263 | 137 | 64 |
| | L9000 | S355 | 574 | 239 | 97 | 38 | 2 |
| | | 1.4003 | 1135 | 444 | 152 | 47 | 5 |
| | | 1.4301 | 1037 | 817 | 268 | 164 | 81 |
| | | 1.4462 | 1154 | 848 | 108 | 42 | 8 |
| e1 | L4500 | S355 | 1389 | 610 | 344 | 197 | 93 |
| | | 1.4003 | 1238 | 511 | 369 | 171 | 76 |
| | | 1.4301 | 1173 | 682 | 476 | 393 | 258 |
| | | 1.4462 | 1699 | 740 | 156 | 121 | 69 |
| | L5100 | S355 | 1192 | 522 | 283 | 158 | 71 |
| | | 1.4003 | 1238 | 511 | 319 | 143 | 61 |
| | | 1.4301 | 1173 | 682 | 424 | 340 | 216 |
| | | 1.4462 | 1700 | 740 | 155 | 104 | 56 |
| | L9000 | S355 | 506 | 214 | 92 | 37 | 2 |
| | | 1.4003 | 970 | 315 | 135 | 43 | 5 |
| | | 1.4301 | 913 | 529 | 214 | 144 | 75 |
| | | 1.4462 | 1101 | 558 | 79 | 36 | 5 |
| e2 | L4500 | S355 | 1120 | 515 | 314 | 188 | 91 |
| | | 1.4003 | 727 | 300 | 311 | 154 | 72 |
| | | 1.4301 | 689 | 401 | 305 | 329 | 228 |
| | | 1.4462 | 998 | 435 | 92 | 101 | 63 |
| | L5100 | S355 | 1002 | 450 | 263 | 152 | 70 |
| | | 1.4003 | 728 | 300 | 274 | 130 | 58 |
| | | 1.4301 | 689 | 401 | 306 | 290 | 196 |
| | | 1.4462 | 998 | 435 | 92 | 89 | 53 |
| | L9000 | S355 | 466 | 200 | 90 | 36 | 2 |
| | | 1.4003 | 729 | 261 | 124 | 42 | 3 |
| | | 1.4301 | 691 | 402 | 187 | 134 | 72 |
| | | 1.4462 | 915 | 436 | 64 | 33 | 5 |

| CHS 273x12,5, C40/50, 8T20 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 50 | R180 c = 60 | R240 c = 60 |
|-------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 2805 | 1175 | 530 | 260 | 120 |
| | | 1.4003 | 2784 | 2192 | 865 | 360 | 152 |
| | | 1.4301 | 2533 | 2533 | 1235 | 663 | 325 |
| | | 1.4462 | 3452 | 2834 | 1117 | 462 | 187 |
| | L5100 | S355 | 2292 | 935 | 418 | 203 | 92 |
| | | 1.4003 | 2534 | 1931 | 697 | 289 | 119 |
| | | 1.4301 | 2305 | 2305 | 1065 | 572 | 282 |
| | | 1.4462 | 3057 | 2580 | 959 | 376 | 150 |
| | L9000 | S355 | 793 | 308 | 123 | 49 | 10 |
| | | 1.4003 | 1332 | 751 | 236 | 86 | 24 |
| | | 1.4301 | 1209 | 1146 | 403 | 212 | 97 |
| | | 1.4462 | 1436 | 1183 | 367 | 128 | 38 |
| e1 | L4500 | S355 | 2329 | 1067 | 508 | 253 | 118 |
| | | 1.4003 | 1933 | 1630 | 769 | 340 | 147 |
| | | 1.4301 | 1736 | 1736 | 1005 | 576 | 299 |
| | | 1.4462 | 2722 | 2012 | 868 | 407 | 176 |
| | L5100 | S355 | 1935 | 866 | 404 | 199 | 90 |
| | | 1.4003 | 1933 | 1418 | 633 | 274 | 116 |
| | | 1.4301 | 1735 | 1735 | 859 | 502 | 261 |
| | | 1.4462 | 2557 | 1851 | 748 | 339 | 142 |
| | L9000 | S355 | 744 | 299 | 122 | 49 | 9 |
| | | 1.4003 | 1213 | 652 | 227 | 84 | 23 |
| | | 1.4301 | 1087 | 907 | 367 | 198 | 92 |
| | | 1.4462 | 1357 | 949 | 330 | 122 | 38 |
| e2 | L4500 | S355 | 1838 | 1010 | 495 | 249 | 117 |
| | | 1.4003 | 1339 | 1339 | 720 | 328 | 143 |
| | | 1.4301 | 1186 | 1186 | 875 | 533 | 285 |
| | | 1.4462 | 1887 | 1327 | 749 | 380 | 168 |
| | L5100 | S355 | 1765 | 828 | 396 | 196 | 90 |
| | | 1.4003 | 1339 | 1210 | 599 | 267 | 114 |
| | | 1.4301 | 1186 | 1186 | 763 | 460 | 249 |
| | | 1.4462 | 1887 | 1328 | 659 | 319 | 138 |
| | L9000 | S355 | 717 | 294 | 121 | 48 | 9 |
| | | 1.4003 | 1052 | 604 | 222 | 82 | 23 |
| | | 1.4301 | 940 | 803 | 347 | 191 | 90 |
| | | 1.4462 | 1216 | 844 | 310 | 119 | 38 |

| CHS 273x12,5, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 50 | R180 c = 60 | R240 c = 60 |
|-------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 2482 | 772 | 371 | 209 | 102 |
| | | 1.4003 | 2438 | 1479 | 535 | 213 | 91 |
| | | 1.4301 | 2186 | 2186 | 906 | 577 | 299 |
| | | 1.4462 | 3159 | 2331 | 395 | 204 | 99 |
| | L5100 | S355 | 1976 | 618 | 295 | 165 | 78 |
| | | 1.4003 | 2233 | 1240 | 441 | 174 | 72 |
| | | 1.4301 | 2002 | 2002 | 755 | 501 | 278 |
| | | 1.4462 | 2808 | 2216 | 336 | 170 | 80 |
| | L9000 | S355 | 668 | 203 | 85 | 38 | 6 |
| | | 1.4003 | 1210 | 516 | 160 | 53 | 10 |
| | | 1.4301 | 1086 | 961 | 302 | 187 | 94 |
| | | 1.4462 | 1336 | 1041 | 145 | 60 | 16 |
| e1 | L4500 | S355 | 1973 | 671 | 345 | 200 | 100 |
| | | 1.4003 | 1678 | 732 | 422 | 187 | 85 |
| | | 1.4301 | 1479 | 937 | 569 | 454 | 282 |
| | | 1.4462 | 2485 | 1139 | 220 | 157 | 87 |
| | L5100 | S355 | 1639 | 551 | 278 | 158 | 76 |
| | | 1.4003 | 1678 | 706 | 361 | 156 | 68 |
| | | 1.4301 | 1479 | 937 | 505 | 392 | 242 |
| | | 1.4462 | 2485 | 1139 | 200 | 136 | 72 |
| | L9000 | S355 | 623 | 194 | 83 | 37 | 6 |
| | | 1.4003 | 1180 | 390 | 146 | 49 | 10 |
| | | 1.4301 | 1039 | 656 | 249 | 167 | 88 |
| | | 1.4462 | 1336 | 737 | 110 | 53 | 15 |
| e2 | L4500 | S355 | 1655 | 620 | 330 | 195 | 98 |
| | | 1.4003 | 1134 | 452 | 374 | 174 | 81 |
| | | 1.4301 | 962 | 578 | 422 | 392 | 261 |
| | | 1.4462 | 1722 | 703 | 140 | 137 | 82 |
| | L5100 | S355 | 1482 | 516 | 268 | 155 | 75 |
| | | 1.4003 | 1134 | 452 | 324 | 146 | 65 |
| | | 1.4301 | 962 | 578 | 419 | 344 | 223 |
| | | 1.4462 | 1722 | 703 | 140 | 121 | 68 |
| | L9000 | S355 | 599 | 189 | 82 | 37 | 6 |
| | | 1.4003 | 1001 | 337 | 140 | 48 | 9 |
| | | 1.4301 | 877 | 550 | 225 | 156 | 85 |
| | | 1.4462 | 1192 | 624 | 94 | 49 | 14 |

| CHS 273x6, C40/50, 8T20 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 50 | R180 c = 60 | R240 c = 60 |
|----------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 1672 | 927 | 408 | 189 | 77 |
| | | 1.4003 | 1940 | 1649 | 619 | 262 | 107 |
| | | 1.4301 | 1798 | 1798 | 925 | 494 | 233 |
| | | 1.4462 | 2156 | 2156 | 868 | 346 | 135 |
| | L5100 | S355 | 1336 | 737 | 320 | 146 | 57 |
| | | 1.4003 | 1729 | 1335 | 492 | 205 | 82 |
| | | 1.4301 | 1601 | 1601 | 746 | 398 | 187 |
| | | 1.4462 | 1888 | 1884 | 702 | 276 | 106 |
| | L9000 | S355 | 454 | 238 | 90 | 30 | 0 |
| | | 1.4003 | 828 | 480 | 155 | 53 | 10 |
| | | 1.4301 | 763 | 705 | 257 | 129 | 53 |
| | | 1.4462 | 850 | 709 | 244 | 81 | 20 |
| e1 | L4500 | S355 | 1371 | 831 | 391 | 185 | 76 |
| | | 1.4003 | 1471 | 1226 | 565 | 251 | 104 |
| | | 1.4301 | 1335 | 1335 | 756 | 432 | 213 |
| | | 1.4462 | 1766 | 1455 | 703 | 318 | 130 |
| | L5100 | S355 | 1136 | 674 | 309 | 143 | 57 |
| | | 1.4003 | 1451 | 1044 | 458 | 199 | 80 |
| | | 1.4301 | 1322 | 1260 | 632 | 356 | 173 |
| | | 1.4462 | 1616 | 1274 | 590 | 257 | 102 |
| | L9000 | S355 | 428 | 231 | 89 | 30 | 0 |
| | | 1.4003 | 770 | 434 | 151 | 52 | 9 |
| | | 1.4301 | 699 | 594 | 241 | 124 | 51 |
| | | 1.4462 | 811 | 598 | 228 | 80 | 20 |
| e2 | L4500 | S355 | 1167 | 781 | 382 | 182 | 76 |
| | | 1.4003 | 930 | 930 | 537 | 245 | 102 |
| | | 1.4301 | 824 | 824 | 680 | 401 | 202 |
| | | 1.4462 | 1167 | 1078 | 629 | 303 | 126 |
| | L5100 | S355 | 1039 | 641 | 303 | 142 | 56 |
| | | 1.4003 | 930 | 919 | 438 | 194 | 79 |
| | | 1.4301 | 824 | 824 | 577 | 335 | 166 |
| | | 1.4462 | 1167 | 1062 | 536 | 247 | 100 |
| | L9000 | S355 | 413 | 227 | 88 | 30 | 0 |
| | | 1.4003 | 675 | 411 | 148 | 52 | 9 |
| | | 1.4301 | 610 | 541 | 232 | 121 | 50 |
| | | 1.4462 | 725 | 546 | 219 | 78 | 20 |

| CHS 273x6, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 50 | R180 c = 60 | R240 c = 60 |
|----------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 1082 | 448 | 209 | 113 | 50 |
| | | 1.4003 | 1617 | 774 | 296 | 115 | 48 |
| | | 1.4301 | 1475 | 1439 | 500 | 333 | 185 |
| | | 1.4462 | 1856 | 1498 | 202 | 104 | 48 |
| | L5100 | S355 | 864 | 360 | 166 | 87 | 36 |
| | | 1.4003 | 1449 | 646 | 242 | 92 | 37 |
| | | 1.4301 | 1321 | 1200 | 414 | 272 | 150 |
| | | 1.4462 | 1630 | 1247 | 171 | 84 | 38 |
| | L9000 | S355 | 289 | 117 | 42 | 13 | 1 |
| | | 1.4003 | 710 | 260 | 81 | 20 | 0 |
| | | 1.4301 | 644 | 488 | 157 | 92 | 42 |
| | | 1.4462 | 741 | 504 | 67 | 22 | 0 |
| e1 | L4500 | S355 | 848 | 370 | 192 | 108 | 49 |
| | | 1.4003 | 950 | 417 | 236 | 102 | 45 |
| | | 1.4301 | 920 | 533 | 326 | 256 | 159 |
| | | 1.4462 | 1513 | 571 | 117 | 80 | 43 |
| | L5100 | S355 | 708 | 308 | 154 | 84 | 36 |
| | | 1.4003 | 950 | 382 | 200 | 83 | 34 |
| | | 1.4301 | 919 | 533 | 286 | 218 | 132 |
| | | 1.4462 | 1490 | 572 | 104 | 69 | 34 |
| | L9000 | S355 | 268 | 109 | 41 | 13 | 1 |
| | | 1.4003 | 618 | 200 | 74 | 20 | 0 |
| | | 1.4301 | 599 | 343 | 132 | 84 | 40 |
| | | 1.4462 | 741 | 358 | 51 | 19 | 0 |
| e2 | L4500 | S355 | 747 | 335 | 183 | 105 | 48 |
| | | 1.4003 | 586 | 258 | 210 | 95 | 43 |
| | | 1.4301 | 568 | 329 | 260 | 224 | 145 |
| | | 1.4462 | 952 | 353 | 79 | 70 | 40 |
| | L5100 | S355 | 636 | 282 | 148 | 82 | 35 |
| | | 1.4003 | 587 | 258 | 180 | 79 | 33 |
| | | 1.4301 | 568 | 329 | 240 | 195 | 122 |
| | | 1.4462 | 952 | 353 | 79 | 61 | 31 |
| | L9000 | S355 | 257 | 105 | 40 | 13 | 1 |
| | | 1.4003 | 523 | 175 | 70 | 19 | 0 |
| | | 1.4301 | 507 | 290 | 120 | 80 | 38 |
| | | 1.4462 | 657 | 304 | 44 | 18 | 0 |

| SHS 400x400x12,5, C40/50, 8T25 | | | R30 c = 20 | R60 c = 25 | R120 c = 45 | R180 c = 65 | R240 c = 75 |
|-----------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 10784 | 8125 | 5709 | 3980 | 2575 |
| | | 1.4003 | 7800 | 7797 | 6068 | 4457 | 3031 |
| | | 1.4301 | 7209 | 7205 | 6724 | 5231 | 3899 |
| | | 1.4462 | 9932 | 9927 | 6547 | 4836 | 3353 |
| | L5100 | S355 | 10549 | 7458 | 4930 | 3233 | 2033 |
| | | 1.4003 | 7394 | 7390 | 5687 | 4011 | 2435 |
| | | 1.4301 | 6828 | 6825 | 6397 | 4910 | 3609 |
| | | 1.4462 | 9287 | 9281 | 6235 | 4504 | 2819 |
| | L9000 | S355 | 6330 | 2956 | 1718 | 1066 | 640 |
| | | 1.4003 | 4974 | 4969 | 2522 | 1404 | 791 |
| | | 1.4301 | 4569 | 4564 | 3593 | 2240 | 1389 |
| | | 1.4462 | 5686 | 5679 | 3496 | 1840 | 941 |
| e1 | L4500 | S355 | 6408 | 6392 | 5017 | 3656 | 2432 |
| | | 1.4003 | 5026 | 5004 | 4925 | 4146 | 2833 |
| | | 1.4301 | 4622 | 4600 | 4511 | 4433 | 3602 |
| | | 1.4462 | 6650 | 6460 | 5284 | 4346 | 3082 |
| | L5100 | S355 | 6406 | 6247 | 4303 | 2977 | 1942 |
| | | 1.4003 | 5025 | 5003 | 4923 | 3597 | 2285 |
| | | 1.4301 | 4619 | 4598 | 4509 | 4292 | 3230 |
| | | 1.4462 | 6648 | 6461 | 5138 | 3963 | 2578 |
| | L9000 | S355 | 5201 | 2648 | 1624 | 1035 | 631 |
| | | 1.4003 | 4846 | 4013 | 2255 | 1337 | 774 |
| | | 1.4301 | 4454 | 4435 | 2900 | 2000 | 1306 |
| | | 1.4462 | 5686 | 5197 | 2780 | 1682 | 911 |
| e2 | L4500 | S355 | 4396 | 4379 | 4309 | 3411 | 2329 |
| | | 1.4003 | 3307 | 3285 | 3196 | 3106 | 2672 |
| | | 1.4301 | 2934 | 2912 | 2823 | 2733 | 2689 |
| | | 1.4462 | 4462 | 3654 | 3403 | 3924 | 2895 |
| | L5100 | S355 | 4396 | 4378 | 3871 | 2800 | 1875 |
| | | 1.4003 | 3307 | 3285 | 3196 | 3106 | 2177 |
| | | 1.4301 | 2934 | 2912 | 2823 | 2733 | 2689 |
| | | 1.4462 | 4461 | 3655 | 3402 | 3537 | 2407 |
| | L9000 | S355 | 4390 | 2447 | 1557 | 1012 | 623 |
| | | 1.4003 | 3311 | 3283 | 2076 | 1289 | 759 |
| | | 1.4301 | 2934 | 2912 | 2516 | 1842 | 1247 |
| | | 1.4462 | 4457 | 3659 | 2395 | 1575 | 887 |

| SHS 400x400x12,5, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 25 | R120 c = 45 | R180 c = 65 | R240 c = 75 |
|-----------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 9365 | 4595 | 2220 | 1300 | 719 |
| | | 1.4003 | 6661 | 6395 | 2572 | 1159 | 477 |
| | | 1.4301 | 6071 | 6071 | 4129 | 2720 | 1745 |
| | | 1.4462 | 8914 | 7718 | 2229 | 871 | 469 |
| | L5100 | S355 | 9177 | 3781 | 1827 | 1063 | 584 |
| | | 1.4003 | 6342 | 5453 | 2179 | 977 | 399 |
| | | 1.4301 | 5778 | 5778 | 3509 | 2296 | 1462 |
| | | 1.4462 | 8368 | 7575 | 1922 | 745 | 396 |
| | L9000 | S355 | 4666 | 1455 | 684 | 371 | 181 |
| | | 1.4003 | 4411 | 2516 | 943 | 397 | 137 |
| | | 1.4301 | 4007 | 4007 | 1584 | 985 | 598 |
| | | 1.4462 | 5260 | 5260 | 926 | 327 | 145 |
| e1 | L4500 | S355 | 5618 | 3125 | 1760 | 1126 | 660 |
| | | 1.4003 | 4211 | 1701 | 1554 | 865 | 398 |
| | | 1.4301 | 3791 | 2409 | 1572 | 1624 | 1251 |
| | | 1.4462 | 5906 | 3094 | 736 | 571 | 365 |
| | L5100 | S355 | 5616 | 2723 | 1501 | 943 | 543 |
| | | 1.4003 | 4210 | 1702 | 1399 | 760 | 340 |
| | | 1.4301 | 3789 | 2409 | 1573 | 1461 | 1097 |
| | | 1.4462 | 5904 | 3095 | 736 | 493 | 319 |
| | L9000 | S355 | 3827 | 1261 | 628 | 353 | 174 |
| | | 1.4003 | 4198 | 1511 | 755 | 350 | 125 |
| | | 1.4301 | 3780 | 2412 | 1084 | 783 | 521 |
| | | 1.4462 | 5222 | 3015 | 578 | 259 | 128 |
| e2 | L4500 | S355 | 3805 | 2410 | 1511 | 1019 | 617 |
| | | 1.4003 | 2525 | 948 | 977 | 722 | 353 |
| | | 1.4301 | 2140 | 1342 | 876 | 1003 | 1019 |
| | | 1.4462 | 3921 | 1724 | 410 | 335 | 308 |
| | L5100 | S355 | 3804 | 2229 | 1315 | 865 | 513 |
| | | 1.4003 | 2525 | 948 | 977 | 645 | 309 |
| | | 1.4301 | 2140 | 1343 | 876 | 1004 | 914 |
| | | 1.4462 | 3921 | 1724 | 410 | 335 | 275 |
| | L9000 | S355 | 3347 | 1141 | 590 | 341 | 171 |
| | | 1.4003 | 2525 | 950 | 650 | 323 | 123 |
| | | 1.4301 | 2140 | 1344 | 865 | 677 | 471 |
| | | 1.4462 | 3917 | 1727 | 411 | 216 | 118 |

| SHS 400x400x10, C40/50, 8T25 | | | R30 c = 20 | R60 c = 25 | R120 c = 45 | R180 c = 65 | R240 c = 75 |
|---------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 9768 | 8023 | 5686 | 3956 | 2569 |
| | | 1.4003 | 7399 | 7395 | 6011 | 4434 | 3000 |
| | | 1.4301 | 6639 | 6636 | 6605 | 5144 | 3838 |
| | | 1.4462 | 8294 | 8289 | 6463 | 4787 | 3317 |
| | L5100 | S355 | 9549 | 7309 | 4871 | 3180 | 2028 |
| | | 1.4003 | 6982 | 6978 | 5611 | 3909 | 2381 |
| | | 1.4301 | 6268 | 6264 | 6249 | 4805 | 3523 |
| | | 1.4462 | 7759 | 7754 | 6129 | 4436 | 2717 |
| | L9000 | S355 | 5366 | 2827 | 1679 | 1048 | 640 |
| | | 1.4003 | 4546 | 4540 | 2353 | 1339 | 771 |
| | | 1.4301 | 4092 | 4086 | 3258 | 2050 | 1277 |
| | | 1.4462 | 4767 | 4760 | 3186 | 1709 | 898 |
| e1 | L4500 | S355 | 5793 | 5774 | 4939 | 3580 | 2410 |
| | | 1.4003 | 4895 | 4874 | 4789 | 4076 | 2762 |
| | | 1.4301 | 4316 | 4293 | 4200 | 4109 | 3521 |
| | | 1.4462 | 5482 | 5461 | 5329 | 4287 | 3021 |
| | L5100 | S355 | 5791 | 5773 | 4150 | 2905 | 1927 |
| | | 1.4003 | 4894 | 4872 | 4788 | 3442 | 2225 |
| | | 1.4301 | 4315 | 4292 | 4199 | 4108 | 3115 |
| | | 1.4462 | 5480 | 5460 | 5080 | 3866 | 2471 |
| | L9000 | S355 | 4405 | 2511 | 1578 | 1015 | 628 |
| | | 1.4003 | 4546 | 3696 | 2107 | 1275 | 752 |
| | | 1.4301 | 4070 | 4050 | 2662 | 1838 | 1202 |
| | | 1.4462 | 4767 | 4618 | 2574 | 1568 | 868 |
| e2 | L4500 | S355 | 3940 | 3922 | 3850 | 3300 | 2297 |
| | | 1.4003 | 3156 | 3134 | 3045 | 2956 | 2596 |
| | | 1.4301 | 2620 | 2597 | 2508 | 2419 | 2410 |
| | | 1.4462 | 3593 | 3367 | 3329 | 3414 | 2792 |
| | L5100 | S355 | 3939 | 3921 | 3700 | 2716 | 1853 |
| | | 1.4003 | 3156 | 3134 | 3045 | 2956 | 2115 |
| | | 1.4301 | 2620 | 2597 | 2508 | 2419 | 2410 |
| | | 1.4462 | 3593 | 3368 | 3331 | 3352 | 2306 |
| | L9000 | S355 | 3858 | 2304 | 1507 | 990 | 619 |
| | | 1.4003 | 3156 | 3065 | 1943 | 1227 | 739 |
| | | 1.4301 | 2620 | 2597 | 2321 | 1701 | 1150 |
| | | 1.4462 | 3590 | 3373 | 2229 | 1471 | 846 |

| SHS 400x400x10, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 25 | R120 c = 45 | R180 c = 65 | R240 c = 75 |
|---------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 8352 | 3888 | 1933 | 1129 | 626 |
| | | 1.4003 | 6293 | 5583 | 2323 | 1050 | 435 |
| | | 1.4301 | 5523 | 5523 | 3401 | 2271 | 1459 |
| | | 1.4462 | 7261 | 7261 | 1756 | 718 | 389 |
| | L5100 | S355 | 8180 | 3214 | 1593 | 926 | 508 |
| | | 1.4003 | 5967 | 4754 | 1960 | 883 | 360 |
| | | 1.4301 | 5241 | 5241 | 2895 | 1917 | 1221 |
| | | 1.4462 | 6824 | 6824 | 1514 | 611 | 325 |
| | L9000 | S355 | 3633 | 1258 | 601 | 324 | 155 |
| | | 1.4003 | 4022 | 2173 | 839 | 353 | 121 |
| | | 1.4301 | 3554 | 3554 | 1306 | 821 | 493 |
| | | 1.4462 | 4322 | 4299 | 722 | 263 | 113 |
| e1 | L4500 | S355 | 4987 | 2523 | 1491 | 963 | 566 |
| | | 1.4003 | 4064 | 1528 | 1406 | 781 | 363 |
| | | 1.4301 | 3222 | 1958 | 1300 | 1355 | 1042 |
| | | 1.4462 | 4711 | 2480 | 583 | 468 | 297 |
| | L5100 | S355 | 4986 | 2218 | 1280 | 810 | 467 |
| | | 1.4003 | 4062 | 1528 | 1264 | 681 | 310 |
| | | 1.4301 | 3222 | 1959 | 1300 | 1220 | 914 |
| | | 1.4462 | 4710 | 2481 | 583 | 422 | 261 |
| | L9000 | S355 | 2958 | 1064 | 547 | 307 | 149 |
| | | 1.4003 | 3938 | 1324 | 671 | 314 | 110 |
| | | 1.4301 | 3222 | 1962 | 891 | 651 | 432 |
| | | 1.4462 | 4255 | 2424 | 457 | 206 | 104 |
| e2 | L4500 | S355 | 3211 | 1776 | 1262 | 862 | 528 |
| | | 1.4003 | 2352 | 851 | 886 | 646 | 321 |
| | | 1.4301 | 1795 | 1091 | 724 | 835 | 850 |
| | | 1.4462 | 2899 | 1382 | 325 | 275 | 253 |
| | L5100 | S355 | 3211 | 1777 | 1107 | 736 | 440 |
| | | 1.4003 | 2352 | 852 | 886 | 579 | 276 |
| | | 1.4301 | 1795 | 1092 | 725 | 834 | 762 |
| | | 1.4462 | 2899 | 1383 | 325 | 276 | 221 |
| | L9000 | S355 | 2580 | 949 | 509 | 293 | 145 |
| | | 1.4003 | 2352 | 853 | 579 | 286 | 104 |
| | | 1.4301 | 1795 | 1093 | 711 | 560 | 388 |
| | | 1.4462 | 2899 | 1385 | 326 | 173 | 93 |

| SHS 350x350x12,5, C40/50, 8T25 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 45 | R180 c = 65 | R240 c = 65 |
|-----------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 8450 | 5464 | 3457 | 3324 | 2305 |
| | | 1.4003 | 6234 | 6234 | 4252 | 2407 | 1332 |
| | | 1.4301 | 5747 | 5747 | 4812 | 3524 | 2243 |
| | | 1.4462 | 7858 | 7569 | 4608 | 3092 | 1722 |
| | L5100 | S355 | 8118 | 4780 | 2841 | 1700 | 951 |
| | | 1.4003 | 5851 | 5851 | 3756 | 2208 | 1179 |
| | | 1.4301 | 5390 | 5390 | 4441 | 3112 | 1938 |
| | | 1.4462 | 7250 | 7250 | 4264 | 2683 | 1396 |
| | L9000 | S355 | 3761 | 1765 | 973 | 552 | 286 |
| | | 1.4003 | 3673 | 3274 | 1445 | 753 | 374 |
| | | 1.4301 | 3365 | 3365 | 2071 | 1257 | 719 |
| | | 1.4462 | 4101 | 4101 | 2009 | 1005 | 462 |
| e1 | L4500 | S355 | 5319 | 4688 | 3143 | 2161 | 1281 |
| | | 1.4003 | 4140 | 4140 | 3676 | 2457 | 1276 |
| | | 1.4301 | 3797 | 3797 | 3686 | 3003 | 2025 |
| | | 1.4462 | 5522 | 5129 | 3728 | 2715 | 1614 |
| | L5100 | S355 | 5316 | 4067 | 2583 | 1620 | 925 |
| | | 1.4003 | 4138 | 4138 | 3278 | 2038 | 1132 |
| | | 1.4301 | 3796 | 3796 | 3616 | 2690 | 1769 |
| | | 1.4462 | 5521 | 5128 | 3468 | 2387 | 1314 |
| | L9000 | S355 | 3276 | 1638 | 940 | 542 | 284 |
| | | 1.4003 | 3401 | 2620 | 1345 | 731 | 368 |
| | | 1.4301 | 3112 | 3112 | 1792 | 1164 | 686 |
| | | 1.4462 | 3921 | 3438 | 1722 | 948 | 452 |
| e2 | L4500 | S355 | 3727 | 3727 | 2917 | 2062 | 1247 |
| | | 1.4003 | 2846 | 2846 | 2741 | 2124 | 1238 |
| | | 1.4301 | 2565 | 2565 | 2437 | 2335 | 1894 |
| | | 1.4462 | 3562 | 3244 | 3128 | 2503 | 1535 |
| | L5100 | S355 | 3727 | 3606 | 2421 | 1565 | 908 |
| | | 1.4003 | 2845 | 2845 | 2740 | 1927 | 1101 |
| | | 1.4301 | 2565 | 2565 | 2437 | 2335 | 1664 |
| | | 1.4462 | 3466 | 3244 | 2977 | 2195 | 1258 |
| | L9000 | S355 | 2991 | 1556 | 916 | 535 | 281 |
| | | 1.4003 | 2842 | 2282 | 1278 | 716 | 365 |
| | | 1.4301 | 2562 | 2562 | 1630 | 1103 | 667 |
| | | 1.4462 | 2945 | 2866 | 1557 | 912 | 445 |

| SHS 350x350x12,5, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 45 | R180 c = 65 | R240 c = 65 |
|-----------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 7493 | 2913 | 1397 | 803 | 433 |
| | | 1.4003 | 5187 | 3496 | 1469 | 767 | 316 |
| | | 1.4301 | 4700 | 4700 | 2885 | 1879 | 1170 |
| | | 1.4462 | 6954 | 5686 | 1455 | 613 | 323 |
| | L5100 | S355 | 7013 | 2391 | 1143 | 649 | 346 |
| | | 1.4003 | 4902 | 3808 | 1479 | 641 | 260 |
| | | 1.4301 | 4441 | 4441 | 2400 | 1575 | 974 |
| | | 1.4462 | 6455 | 5534 | 1250 | 523 | 270 |
| | L9000 | S355 | 2884 | 882 | 401 | 208 | 91 |
| | | 1.4003 | 3225 | 1712 | 614 | 247 | 79 |
| | | 1.4301 | 2915 | 2915 | 1051 | 653 | 380 |
| | | 1.4462 | 3779 | 3584 | 588 | 219 | 89 |
| e1 | L4500 | S355 | 4563 | 2659 | 1321 | 730 | 409 |
| | | 1.4003 | 3050 | 1300 | 1038 | 614 | 277 |
| | | 1.4301 | 3022 | 2001 | 1326 | 1219 | 889 |
| | | 1.4462 | 4816 | 2529 | 570 | 400 | 261 |
| | L5100 | S355 | 4562 | 1886 | 999 | 600 | 331 |
| | | 1.4003 | 3375 | 1434 | 1039 | 529 | 233 |
| | | 1.4301 | 3021 | 1983 | 1323 | 1082 | 772 |
| | | 1.4462 | 4814 | 2530 | 570 | 359 | 224 |
| | L9000 | S355 | 2489 | 799 | 380 | 201 | 89 |
| | | 1.4003 | 3131 | 1112 | 519 | 225 | 73 |
| | | 1.4301 | 2817 | 1851 | 768 | 545 | 341 |
| | | 1.4462 | 3779 | 2198 | 393 | 183 | 81 |
| e2 | L4500 | S355 | 3167 | 2244 | 1180 | 685 | 394 |
| | | 1.4003 | 1756 | 749 | 900 | 533 | 253 |
| | | 1.4301 | 1822 | 1152 | 761 | 889 | 757 |
| | | 1.4462 | 3278 | 1456 | 328 | 306 | 232 |
| | L5100 | S355 | 3166 | 1630 | 915 | 568 | 319 |
| | | 1.4003 | 2150 | 826 | 852 | 468 | 215 |
| | | 1.4301 | 1822 | 1141 | 762 | 878 | 668 |
| | | 1.4462 | 3278 | 1456 | 328 | 292 | 201 |
| | L9000 | S355 | 2261 | 746 | 366 | 197 | 88 |
| | | 1.4003 | 2150 | 827 | 464 | 212 | 73 |
| | | 1.4301 | 1824 | 1143 | 643 | 484 | 319 |
| | | 1.4462 | 3192 | 1458 | 316 | 161 | 76 |

| SHS 350x350x8, C40/50, 8T25 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 45 | R180 c = 65 | R240 c = 65 |
|--------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 6730 | 5274 | 3376 | 2079 | 1188 |
| | | 1.4003 | 5336 | 5336 | 4087 | 2540 | 1410 |
| | | 1.4301 | 4839 | 4839 | 4638 | 3310 | 2091 |
| | | 1.4462 | 5505 | 5505 | 4517 | 2946 | 1607 |
| | L5100 | S355 | 6429 | 4551 | 2711 | 1650 | 937 |
| | | 1.4003 | 4960 | 4960 | 3508 | 2036 | 1117 |
| | | 1.4301 | 4499 | 4499 | 4185 | 2854 | 1753 |
| | | 1.4462 | 5082 | 5082 | 4089 | 2484 | 1281 |
| | L9000 | S355 | 2793 | 1631 | 925 | 534 | 283 |
| | | 1.4003 | 2924 | 2698 | 1264 | 683 | 351 |
| | | 1.4301 | 2654 | 2654 | 1722 | 1051 | 600 |
| | | 1.4462 | 2884 | 2884 | 1691 | 869 | 415 |
| e1 | L4500 | S355 | 4201 | 4201 | 2951 | 1935 | 1142 |
| | | 1.4003 | 3725 | 3725 | 3436 | 2297 | 1337 |
| | | 1.4301 | 3323 | 3323 | 3190 | 2823 | 1891 |
| | | 1.4462 | 3754 | 3754 | 3628 | 2583 | 1491 |
| | L5100 | S355 | 4200 | 3646 | 2423 | 1558 | 908 |
| | | 1.4003 | 3724 | 3724 | 2955 | 1872 | 1070 |
| | | 1.4301 | 3322 | 3322 | 3190 | 2471 | 1580 |
| | | 1.4462 | 3753 | 3753 | 3254 | 2166 | 1205 |
| | L9000 | S355 | 2432 | 1495 | 888 | 524 | 279 |
| | | 1.4003 | 2837 | 2209 | 1179 | 662 | 345 |
| | | 1.4301 | 2500 | 2500 | 1513 | 981 | 577 |
| | | 1.4462 | 2718 | 2718 | 1477 | 823 | 405 |
| e2 | L4500 | S355 | 2891 | 2891 | 2694 | 1841 | 1110 |
| | | 1.4003 | 2453 | 2453 | 2325 | 2142 | 1287 |
| | | 1.4301 | 2076 | 2076 | 1949 | 1857 | 1761 |
| | | 1.4462 | 2424 | 2424 | 2311 | 2220 | 1415 |
| | L5100 | S355 | 2891 | 2891 | 2246 | 1496 | 888 |
| | | 1.4003 | 2453 | 2453 | 2325 | 1767 | 1039 |
| | | 1.4301 | 2076 | 2076 | 1949 | 1857 | 1472 |
| | | 1.4462 | 2424 | 2424 | 2311 | 1977 | 1154 |
| | L9000 | S355 | 2220 | 1409 | 862 | 516 | 277 |
| | | 1.4003 | 2332 | 1947 | 1122 | 648 | 342 |
| | | 1.4301 | 2036 | 2036 | 1388 | 935 | 562 |
| | | 1.4462 | 2243 | 2243 | 1349 | 794 | 399 |

| SHS 350x350x8, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 45 | R180 c = 65 | R240 c = 65 |
|--------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 5754 | 2131 | 1053 | 596 | 319 |
| | | 1.4003 | 4350 | 3162 | 1315 | 575 | 236 |
| | | 1.4301 | 3843 | 3843 | 1928 | 1302 | 808 |
| | | 1.4462 | 4567 | 4567 | 918 | 414 | 218 |
| | L5100 | S355 | 4823 | 1752 | 862 | 483 | 254 |
| | | 1.4003 | 4076 | 2684 | 1103 | 478 | 192 |
| | | 1.4301 | 3604 | 3604 | 1632 | 1093 | 674 |
| | | 1.4462 | 4251 | 4251 | 789 | 354 | 182 |
| | L9000 | S355 | 1753 | 662 | 304 | 151 | 61 |
| | | 1.4003 | 2527 | 1197 | 449 | 175 | 53 |
| | | 1.4301 | 2247 | 2099 | 713 | 447 | 254 |
| | | 1.4462 | 2527 | 2350 | 368 | 144 | 53 |
| e1 | L4500 | S355 | 3418 | 1493 | 866 | 533 | 299 |
| | | 1.4003 | 2901 | 1048 | 873 | 455 | 206 |
| | | 1.4301 | 2214 | 1324 | 913 | 847 | 618 |
| | | 1.4462 | 2996 | 1650 | 366 | 271 | 177 |
| | L5100 | S355 | 3307 | 1295 | 730 | 439 | 240 |
| | | 1.4003 | 2901 | 1048 | 772 | 391 | 171 |
| | | 1.4301 | 2214 | 1324 | 906 | 751 | 534 |
| | | 1.4462 | 2995 | 1651 | 366 | 242 | 149 |
| | L9000 | S355 | 1498 | 580 | 284 | 145 | 59 |
| | | 1.4003 | 2451 | 785 | 377 | 161 | 48 |
| | | 1.4301 | 2017 | 1224 | 520 | 371 | 229 |
| | | 1.4462 | 2420 | 1436 | 246 | 113 | 47 |
| e2 | L4500 | S355 | 2136 | 1223 | 765 | 494 | 284 |
| | | 1.4003 | 1670 | 603 | 670 | 395 | 187 |
| | | 1.4301 | 1274 | 762 | 526 | 623 | 525 |
| | | 1.4462 | 1738 | 950 | 211 | 210 | 156 |
| | L5100 | S355 | 2136 | 1087 | 657 | 412 | 231 |
| | | 1.4003 | 1670 | 603 | 633 | 346 | 160 |
| | | 1.4301 | 1274 | 762 | 526 | 611 | 463 |
| | | 1.4462 | 1738 | 950 | 211 | 199 | 135 |
| | L9000 | S355 | 1352 | 532 | 271 | 141 | 59 |
| | | 1.4003 | 1672 | 606 | 338 | 150 | 46 |
| | | 1.4301 | 1274 | 764 | 435 | 331 | 213 |
| | | 1.4462 | 1736 | 951 | 196 | 101 | 44 |

| SHS 300x300x12,5, C40/50, 8T20 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 45 | R180 c = 60 | R240 c = 65 |
|-----------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 5917 | 3015 | 1587 | 850 | 414 |
| | | 1.4003 | 4465 | 4086 | 2277 | 1179 | 547 |
| | | 1.4301 | 4082 | 4082 | 2766 | 1758 | 988 |
| | | 1.4462 | 5648 | 4975 | 2598 | 1448 | 681 |
| | L5100 | S355 | 5176 | 2441 | 1264 | 672 | 323 |
| | | 1.4003 | 4145 | 3795 | 1938 | 944 | 433 |
| | | 1.4301 | 3788 | 3788 | 2490 | 1540 | 856 |
| | | 1.4462 | 5129 | 4700 | 2352 | 1240 | 546 |
| | L9000 | S355 | 2000 | 851 | 413 | 201 | 79 |
| | | 1.4003 | 2428 | 1769 | 690 | 310 | 123 |
| | | 1.4301 | 2210 | 2210 | 1057 | 603 | 311 |
| | | 1.4462 | 2678 | 2677 | 1008 | 442 | 170 |
| e1 | L4500 | S355 | 4047 | 2592 | 1477 | 820 | 406 |
| | | 1.4003 | 3072 | 3072 | 2015 | 1097 | 529 |
| | | 1.4301 | 2788 | 2788 | 2260 | 1524 | 904 |
| | | 1.4462 | 4228 | 3470 | 2119 | 1300 | 642 |
| | L5100 | S355 | 4046 | 2144 | 1193 | 653 | 319 |
| | | 1.4003 | 3072 | 2948 | 1694 | 891 | 422 |
| | | 1.4301 | 2787 | 2787 | 2057 | 1354 | 791 |
| | | 1.4462 | 4227 | 3470 | 1928 | 1102 | 520 |
| | L9000 | S355 | 1813 | 811 | 405 | 199 | 78 |
| | | 1.4003 | 2261 | 1467 | 654 | 303 | 121 |
| | | 1.4301 | 2051 | 1927 | 939 | 563 | 299 |
| | | 1.4462 | 2577 | 2034 | 885 | 421 | 167 |
| e2 | L4500 | S355 | 2901 | 2361 | 1412 | 801 | 401 |
| | | 1.4003 | 2167 | 2167 | 1850 | 1049 | 518 |
| | | 1.4301 | 1949 | 1949 | 1860 | 1403 | 857 |
| | | 1.4462 | 2976 | 2277 | 1855 | 1213 | 617 |
| | L5100 | S355 | 2901 | 1982 | 1149 | 640 | 316 |
| | | 1.4003 | 2166 | 2166 | 1563 | 858 | 414 |
| | | 1.4301 | 1949 | 1949 | 1810 | 1253 | 753 |
| | | 1.4462 | 2976 | 2277 | 1646 | 1025 | 503 |
| | L9000 | S355 | 1707 | 786 | 400 | 198 | 78 |
| | | 1.4003 | 1943 | 1317 | 633 | 299 | 121 |
| | | 1.4301 | 1742 | 1650 | 874 | 540 | 291 |
| | | 1.4462 | 2264 | 1754 | 819 | 408 | 164 |

| SHS 300x300x12,5, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 45 | R180 c = 60 | R240 c = 65 |
|-----------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 5123 | 1716 | 818 | 462 | 245 |
| | | 1.4003 | 3863 | 2930 | 1111 | 468 | 195 |
| | | 1.4301 | 3479 | 3479 | 1798 | 1209 | 727 |
| | | 1.4462 | 5155 | 3937 | 826 | 400 | 204 |
| | L5100 | S355 | 4496 | 1388 | 659 | 369 | 192 |
| | | 1.4003 | 3612 | 2476 | 926 | 388 | 159 |
| | | 1.4301 | 3253 | 3253 | 1511 | 1010 | 601 |
| | | 1.4462 | 4710 | 3801 | 711 | 338 | 168 |
| | L9000 | S355 | 1640 | 487 | 215 | 106 | 40 |
| | | 1.4003 | 2209 | 1081 | 365 | 137 | 39 |
| | | 1.4301 | 1988 | 1988 | 639 | 401 | 222 |
| | | 1.4462 | 2531 | 2235 | 324 | 136 | 49 |
| e1 | L4500 | S355 | 3587 | 1408 | 734 | 434 | 237 |
| | | 1.4003 | 2613 | 1156 | 812 | 395 | 175 |
| | | 1.4301 | 2325 | 1558 | 1026 | 846 | 581 |
| | | 1.4462 | 3800 | 1967 | 390 | 283 | 174 |
| | L5100 | S355 | 3584 | 1178 | 603 | 351 | 187 |
| | | 1.4003 | 2612 | 1157 | 706 | 334 | 145 |
| | | 1.4301 | 2323 | 1558 | 924 | 741 | 498 |
| | | 1.4462 | 3799 | 1967 | 391 | 250 | 147 |
| | L9000 | S355 | 1478 | 457 | 208 | 104 | 40 |
| | | 1.4003 | 2183 | 757 | 323 | 128 | 38 |
| | | 1.4301 | 1953 | 1275 | 499 | 347 | 204 |
| | | 1.4462 | 2531 | 1483 | 230 | 118 | 46 |
| e2 | L4500 | S355 | 2561 | 1257 | 688 | 417 | 231 |
| | | 1.4003 | 1779 | 694 | 687 | 357 | 166 |
| | | 1.4301 | 1508 | 935 | 638 | 706 | 515 |
| | | 1.4462 | 2665 | 1180 | 234 | 239 | 157 |
| | L5100 | S355 | 2561 | 1071 | 570 | 340 | 184 |
| | | 1.4003 | 1779 | 694 | 610 | 308 | 138 |
| | | 1.4301 | 1508 | 935 | 638 | 631 | 447 |
| | | 1.4462 | 2664 | 1181 | 234 | 212 | 136 |
| | L9000 | S355 | 1386 | 438 | 203 | 102 | 40 |
| | | 1.4003 | 1781 | 631 | 299 | 123 | 38 |
| | | 1.4301 | 1508 | 936 | 436 | 320 | 194 |
| | | 1.4462 | 2234 | 1182 | 192 | 105 | 44 |

| SHS 300x300x6, C40/50, 8T20 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 45 | R180 c = 60 | R240 c = 65 |
|--------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 3954 | 2593 | 1402 | 756 | 360 |
| | | 1.4003 | 3221 | 3221 | 1912 | 977 | 456 |
| | | 1.4301 | 3070 | 3070 | 2460 | 1514 | 821 |
| | | 1.4462 | 3143 | 3143 | 2394 | 1229 | 551 |
| | L5100 | S355 | 3427 | 2080 | 1114 | 595 | 279 |
| | | 1.4003 | 2942 | 2942 | 1534 | 775 | 358 |
| | | 1.4301 | 2795 | 2795 | 2080 | 1232 | 658 |
| | | 1.4462 | 2857 | 2857 | 2015 | 985 | 435 |
| | L9000 | S355 | 1217 | 721 | 360 | 175 | 65 |
| | | 1.4003 | 1573 | 1255 | 524 | 244 | 94 |
| | | 1.4301 | 1473 | 1473 | 751 | 424 | 212 |
| | | 1.4462 | 1495 | 1495 | 735 | 328 | 124 |
| e1 | L4500 | S355 | 2471 | 2128 | 1285 | 725 | 353 |
| | | 1.4003 | 2378 | 2378 | 1643 | 913 | 442 |
| | | 1.4301 | 2287 | 2287 | 1950 | 1300 | 748 |
| | | 1.4462 | 2204 | 2204 | 1859 | 1091 | 525 |
| | L5100 | S355 | 2470 | 1770 | 1038 | 575 | 275 |
| | | 1.4003 | 2377 | 2323 | 1355 | 734 | 349 |
| | | 1.4301 | 2286 | 2286 | 1656 | 1078 | 609 |
| | | 1.4462 | 2203 | 2203 | 1584 | 894 | 419 |
| | L9000 | S355 | 1104 | 678 | 351 | 173 | 65 |
| | | 1.4003 | 1486 | 1075 | 500 | 239 | 94 |
| | | 1.4301 | 1389 | 1367 | 686 | 403 | 205 |
| | | 1.4462 | 1347 | 1347 | 665 | 316 | 123 |
| e2 | L4500 | S355 | 1599 | 1599 | 1216 | 706 | 348 |
| | | 1.4003 | 1510 | 1510 | 1415 | 875 | 434 |
| | | 1.4301 | 1425 | 1425 | 1330 | 1183 | 706 |
| | | 1.4462 | 1343 | 1343 | 1258 | 1015 | 509 |
| | L5100 | S355 | 1599 | 1599 | 993 | 563 | 272 |
| | | 1.4003 | 1510 | 1510 | 1257 | 709 | 343 |
| | | 1.4301 | 1425 | 1425 | 1330 | 995 | 581 |
| | | 1.4462 | 1343 | 1343 | 1258 | 842 | 408 |
| | L9000 | S355 | 1039 | 653 | 346 | 172 | 65 |
| | | 1.4003 | 1264 | 982 | 486 | 236 | 93 |
| | | 1.4301 | 1183 | 1183 | 647 | 390 | 202 |
| | | 1.4462 | 1142 | 1142 | 627 | 309 | 121 |

| SHS 300x300x6, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 20 | R120 c = 45 | R180 c = 60 | R240 c = 65 |
|--------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 2594 | 1041 | 502 | 274 | 142 |
| | | 1.4003 | 2673 | 1607 | 654 | 275 | 112 |
| | | 1.4301 | 2531 | 2531 | 1027 | 699 | 418 |
| | | 1.4462 | 2612 | 2612 | 403 | 211 | 105 |
| | L5100 | S355 | 2092 | 849 | 405 | 218 | 110 |
| | | 1.4003 | 2464 | 1357 | 543 | 225 | 89 |
| | | 1.4301 | 2328 | 2328 | 862 | 581 | 343 |
| | | 1.4462 | 2398 | 2398 | 346 | 177 | 85 |
| | L9000 | S355 | 739 | 304 | 128 | 55 | 13 |
| | | 1.4003 | 1384 | 583 | 205 | 71 | 12 |
| | | 1.4301 | 1289 | 1083 | 354 | 220 | 116 |
| | | 1.4462 | 1315 | 1144 | 151 | 60 | 14 |
| e1 | L4500 | S355 | 1834 | 787 | 436 | 254 | 156 |
| | | 1.4003 | 1679 | 664 | 478 | 230 | 86 |
| | | 1.4301 | 1529 | 902 | 601 | 500 | 342 |
| | | 1.4462 | 1492 | 1012 | 200 | 150 | 91 |
| | L5100 | S355 | 1568 | 672 | 361 | 205 | 106 |
| | | 1.4003 | 1679 | 665 | 415 | 194 | 81 |
| | | 1.4301 | 1529 | 903 | 540 | 435 | 289 |
| | | 1.4462 | 1492 | 1013 | 201 | 133 | 74 |
| | L9000 | S355 | 659 | 276 | 122 | 54 | 13 |
| | | 1.4003 | 1286 | 414 | 181 | 66 | 12 |
| | | 1.4301 | 1178 | 701 | 280 | 193 | 108 |
| | | 1.4462 | 1162 | 758 | 106 | 53 | 14 |
| e2 | L4500 | S355 | 1101 | 677 | 402 | 243 | 151 |
| | | 1.4003 | 1007 | 399 | 405 | 208 | 81 |
| | | 1.4301 | 917 | 542 | 390 | 420 | 305 |
| | | 1.4462 | 895 | 607 | 120 | 127 | 83 |
| | L5100 | S355 | 1101 | 590 | 337 | 197 | 104 |
| | | 1.4003 | 1007 | 399 | 359 | 177 | 77 |
| | | 1.4301 | 917 | 542 | 391 | 373 | 261 |
| | | 1.4462 | 895 | 608 | 121 | 113 | 70 |
| | L9000 | S355 | 614 | 259 | 118 | 53 | 13 |
| | | 1.4003 | 1008 | 347 | 169 | 63 | 12 |
| | | 1.4301 | 916 | 543 | 246 | 177 | 103 |
| | | 1.4462 | 897 | 609 | 88 | 48 | 14 |

| SHS 250x250x12,5, C40/50, 8T16 | | | R30 c = 20 | R60 c = 45 | R120 c = 45 | R180 c = 45 | R240 c = 20 |
|-----------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 3244 | 1205 | 635 | 305 | 152 |
| | | 1.4003 | 3016 | 2097 | 914 | 357 | 163 |
| | | 1.4301 | 2736 | 2736 | 1363 | 708 | 353 |
| | | 1.4462 | 3776 | 3008 | 1221 | 518 | 223 |
| | L5100 | S355 | 2707 | 1108 | 505 | 241 | 119 |
| | | 1.4003 | 2754 | 2106 | 832 | 337 | 146 |
| | | 1.4301 | 2497 | 2497 | 1195 | 625 | 314 |
| | | 1.4462 | 3354 | 2783 | 1084 | 434 | 180 |
| | L9000 | S355 | 954 | 370 | 153 | 61 | 19 |
| | | 1.4003 | 1473 | 878 | 287 | 104 | 33 |
| | | 1.4301 | 1333 | 1333 | 481 | 249 | 119 |
| | | 1.4462 | 1593 | 1392 | 438 | 152 | 50 |
| e1 | L4500 | S355 | 2967 | 1389 | 666 | 328 | 168 |
| | | 1.4003 | 2195 | 1668 | 821 | 338 | 158 |
| | | 1.4301 | 1970 | 1583 | 1123 | 624 | 329 |
| | | 1.4462 | 3116 | 2196 | 1001 | 462 | 208 |
| | L5100 | S355 | 2306 | 1019 | 487 | 236 | 117 |
| | | 1.4003 | 2194 | 1599 | 753 | 320 | 142 |
| | | 1.4301 | 1970 | 1940 | 1000 | 557 | 293 |
| | | 1.4462 | 2886 | 2053 | 870 | 387 | 171 |
| | L9000 | S355 | 894 | 360 | 151 | 61 | 19 |
| | | 1.4003 | 1377 | 755 | 277 | 102 | 32 |
| | | 1.4301 | 1238 | 1051 | 435 | 232 | 114 |
| | | 1.4462 | 1539 | 1109 | 391 | 145 | 49 |
| e2 | L4500 | S355 | 2193 | 1310 | 648 | 323 | 166 |
| | | 1.4003 | 1603 | 1433 | 776 | 328 | 155 |
| | | 1.4301 | 1428 | 1396 | 1021 | 585 | 316 |
| | | 1.4462 | 2268 | 1552 | 875 | 431 | 201 |
| | L5100 | S355 | 2114 | 974 | 477 | 233 | 116 |
| | | 1.4003 | 1602 | 1372 | 714 | 311 | 139 |
| | | 1.4301 | 1428 | 1393 | 897 | 523 | 281 |
| | | 1.4462 | 2268 | 1552 | 770 | 364 | 165 |
| | L9000 | S355 | 862 | 353 | 150 | 61 | 18 |
| | | 1.4003 | 1220 | 700 | 271 | 101 | 32 |
| | | 1.4301 | 1087 | 935 | 413 | 225 | 112 |
| | | 1.4462 | 1398 | 993 | 368 | 141 | 48 |

| SHS 250x250x12,5, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 45 | R120 c = 45 | R180 c = 45 | R240 c = 20 |
|-----------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 2930 | 894 | 430 | 244 | 125 |
| | | 1.4003 | 2691 | 1364 | 537 | 201 | 93 |
| | | 1.4301 | 2408 | 2328 | 1038 | 598 | 310 |
| | | 1.4462 | 3532 | 2480 | 450 | 237 | 116 |
| | L5100 | S355 | 2415 | 720 | 344 | 193 | 97 |
| | | 1.4003 | 2476 | 1451 | 517 | 208 | 86 |
| | | 1.4301 | 2216 | 2217 | 867 | 559 | 290 |
| | | 1.4462 | 3156 | 2374 | 383 | 197 | 94 |
| | L9000 | S355 | 821 | 238 | 102 | 47 | 12 |
| | | 1.4003 | 1378 | 610 | 191 | 65 | 14 |
| | | 1.4301 | 1235 | 1144 | 355 | 221 | 114 |
| | | 1.4462 | 1534 | 1249 | 168 | 73 | 21 |
| e1 | L4500 | S355 | 2690 | 934 | 442 | 258 | 139 |
| | | 1.4003 | 1710 | 779 | 436 | 180 | 87 |
| | | 1.4301 | 1701 | 1154 | 664 | 532 | 294 |
| | | 1.4462 | 2861 | 1419 | 258 | 180 | 102 |
| | L5100 | S355 | 2007 | 646 | 324 | 187 | 95 |
| | | 1.4003 | 1925 | 835 | 424 | 187 | 81 |
| | | 1.4301 | 1700 | 1144 | 588 | 458 | 272 |
| | | 1.4462 | 2860 | 1419 | 231 | 156 | 84 |
| | L9000 | S355 | 767 | 229 | 100 | 46 | 12 |
| | | 1.4003 | 1376 | 462 | 175 | 63 | 14 |
| | | 1.4301 | 1220 | 788 | 293 | 198 | 107 |
| | | 1.4462 | 1534 | 895 | 128 | 65 | 20 |
| e2 | L4500 | S355 | 1992 | 871 | 424 | 251 | 137 |
| | | 1.4003 | 1085 | 513 | 393 | 170 | 84 |
| | | 1.4301 | 1198 | 732 | 510 | 465 | 283 |
| | | 1.4462 | 2083 | 900 | 167 | 159 | 95 |
| | L5100 | S355 | 1828 | 610 | 314 | 183 | 94 |
| | | 1.4003 | 1397 | 555 | 384 | 176 | 77 |
| | | 1.4301 | 1198 | 725 | 495 | 408 | 263 |
| | | 1.4462 | 2083 | 900 | 167 | 141 | 79 |
| | L9000 | S355 | 739 | 224 | 99 | 46 | 12 |
| | | 1.4003 | 1195 | 406 | 167 | 61 | 14 |
| | | 1.4301 | 1047 | 668 | 267 | 187 | 104 |
| | | 1.4462 | 1413 | 769 | 112 | 62 | 20 |

| SHS 250x250x6, C40/50, 8T16 | | | R30 c = 20 | R60 c = 45 | R120 c = 45 | R180 c = 45 | R240 c = 20 |
|--------------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 2150 | 1227 | 558 | 250 | 126 |
| | | 1.4003 | 2159 | 2159 | 871 | 357 | 165 |
| | | 1.4301 | 1991 | 1991 | 1287 | 681 | 354 |
| | | 1.4462 | 2255 | 2255 | 1239 | 487 | 209 |
| | L5100 | S355 | 1705 | 971 | 436 | 193 | 96 |
| | | 1.4003 | 1934 | 1865 | 690 | 281 | 128 |
| | | 1.4301 | 1780 | 1780 | 1061 | 554 | 289 |
| | | 1.4462 | 1996 | 1996 | 1012 | 388 | 165 |
| | L9000 | S355 | 568 | 313 | 126 | 44 | 11 |
| | | 1.4003 | 946 | 661 | 219 | 76 | 24 |
| | | 1.4301 | 866 | 866 | 362 | 182 | 86 |
| | | 1.4462 | 932 | 932 | 349 | 119 | 39 |
| e1 | L4500 | S355 | 1740 | 1077 | 530 | 243 | 124 |
| | | 1.4003 | 1735 | 1585 | 778 | 339 | 160 |
| | | 1.4301 | 1586 | 1586 | 1031 | 583 | 322 |
| | | 1.4462 | 1846 | 1846 | 960 | 433 | 198 |
| | L5100 | S355 | 1437 | 874 | 419 | 189 | 94 |
| | | 1.4003 | 1734 | 1359 | 630 | 268 | 124 |
| | | 1.4301 | 1586 | 1586 | 864 | 482 | 263 |
| | | 1.4462 | 1839 | 1669 | 809 | 353 | 157 |
| | L9000 | S355 | 533 | 301 | 124 | 43 | 11 |
| | | 1.4003 | 946 | 582 | 212 | 75 | 23 |
| | | 1.4301 | 866 | 796 | 334 | 172 | 83 |
| | | 1.4462 | 932 | 805 | 320 | 116 | 38 |
| e2 | L4500 | S355 | 1498 | 1006 | 515 | 239 | 123 |
| | | 1.4003 | 1191 | 1191 | 733 | 329 | 157 |
| | | 1.4301 | 1048 | 1048 | 915 | 535 | 304 |
| | | 1.4462 | 1276 | 1225 | 845 | 408 | 191 |
| | L5100 | S355 | 1317 | 826 | 410 | 187 | 94 |
| | | 1.4003 | 1191 | 1176 | 600 | 262 | 122 |
| | | 1.4301 | 1048 | 1048 | 780 | 449 | 251 |
| | | 1.4462 | 1276 | 1225 | 727 | 335 | 153 |
| | L9000 | S355 | 515 | 295 | 124 | 43 | 11 |
| | | 1.4003 | 866 | 544 | 208 | 75 | 23 |
| | | 1.4301 | 781 | 716 | 320 | 167 | 81 |
| | | 1.4462 | 855 | 727 | 305 | 113 | 38 |

| SHS 250x250x6, C40/50 | | | R30 c = 20 | R60 c = 45 | R120 c = 45 | R180 c = 45 | R240 c = 20 |
|--------------------------|-------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| e0 | L4500 | S355 | 1322 | 548 | 259 | 142 | 71 |
| | | 1.4003 | 1872 | 970 | 374 | 151 | 62 |
| | | 1.4301 | 1704 | 1704 | 617 | 415 | 237 |
| | | 1.4462 | 2000 | 1939 | 243 | 129 | 61 |
| | L5100 | S355 | 1055 | 441 | 205 | 110 | 53 |
| | | 1.4003 | 1693 | 812 | 307 | 122 | 48 |
| | | 1.4301 | 1540 | 1525 | 513 | 341 | 193 |
| | | 1.4462 | 1785 | 1614 | 207 | 106 | 48 |
| | L9000 | S355 | 355 | 145 | 56 | 20 | 0 |
| | | 1.4003 | 863 | 334 | 106 | 31 | 1 |
| | | 1.4301 | 782 | 629 | 200 | 121 | 59 |
| | | 1.4462 | 863 | 656 | 86 | 31 | 2 |
| e1 | L4500 | S355 | 1061 | 461 | 238 | 135 | 69 |
| | | 1.4003 | 1321 | 528 | 298 | 133 | 58 |
| | | 1.4301 | 1175 | 688 | 402 | 319 | 204 |
| | | 1.4462 | 1574 | 761 | 144 | 99 | 54 |
| | L5100 | S355 | 882 | 382 | 192 | 106 | 52 |
| | | 1.4003 | 1321 | 481 | 254 | 110 | 45 |
| | | 1.4301 | 1175 | 689 | 354 | 273 | 169 |
| | | 1.4462 | 1574 | 762 | 127 | 84 | 44 |
| | L9000 | S355 | 332 | 137 | 54 | 20 | 0 |
| | | 1.4003 | 827 | 257 | 98 | 30 | 1 |
| | | 1.4301 | 749 | 444 | 168 | 110 | 56 |
| | | 1.4462 | 862 | 472 | 66 | 28 | 2 |
| e2 | L4500 | S355 | 953 | 422 | 228 | 132 | 68 |
| | | 1.4003 | 838 | 335 | 267 | 124 | 55 |
| | | 1.4301 | 745 | 437 | 328 | 281 | 187 |
| | | 1.4462 | 1019 | 483 | 97 | 88 | 51 |
| | L5100 | S355 | 806 | 355 | 185 | 104 | 51 |
| | | 1.4003 | 838 | 335 | 230 | 104 | 43 |
| | | 1.4301 | 745 | 437 | 301 | 245 | 158 |
| | | 1.4462 | 1019 | 483 | 97 | 76 | 42 |
| | L9000 | S355 | 320 | 133 | 54 | 20 | 0 |
| | | 1.4003 | 712 | 227 | 94 | 30 | 1 |
| | | 1.4301 | 643 | 379 | 153 | 104 | 54 |
| | | 1.4462 | 757 | 405 | 56 | 27 | 2 |